



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

ONLINE DIAGNOSTIKA OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

ONLINE DIAGNOSTICS OF MACHINE TOOLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Zářecký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Tomáš Zárecký**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Zuth, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Online diagnostika obráběcích strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat popisem konkrétního řešení online vibrodiagnostického zařízení od fy 4dot Mechatronic Systems na obráběcím stroji. Práce bude obsahovat popis instalovaného zařízení včetně podrobného popisu ovládání dodaného SW. Poté bude provedena série testovacích měření, která ověří možnosti použitého systému.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v oblasti vibrodiagnostiky a online vibrodiagnostických systému.
Popis použitého obráběcího stroje včetně uchycení senzorů.
Popis použitého online diagnostického zařízení a srovnat s ostatními výrobci.
Popsat, provést a vyhodnotit sérii měření.
Vytvořit dokumentaci k použitému systému.
Vyhodnocení dosažených výsledků.
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.

BROCH, Jens Trampe. Mechanical Vibration and Shock Measurements. 2nd Edition. Naerum: Brüel & Kjaer, 1984. ISBN 8787355361.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vibrační diagnostikou a on-line monitorovacími systémy několika výrobců. Dále tato práce obsahuje popis a vyhodnocení měření vibrací vřetene obráběcího stroje při obrábění testovacích vzorků různými řeznými podmínkami a vyhodnocení kvality povrchu testovacích vzorků.

ABSTRACT

This thesis deals with vibration diagnostics and on-line monitoring systems of several producers. Furthermore, this thesis contains a description and evaluation of measuring the vibrations of the machine tool spindle when machining test samples with different cutting conditions and evaluating the surface quality of test samples.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technická diagnostika, vibrační diagnostika, on-line monitorovací systém, frekvenční analýza.

KEYWORDS

Technical diagnostics, vibration diagnostics, on-line monitoring system, frequency analysis.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZÁŘECKÝ, Tomáš. *Online diagnostika obráběcích strojů*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124765>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Daniel Zuth, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Danielu Zuthovi, Ph.D. za velice vstřícný přístup, cenné rady a věcné připomínky při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji své rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Daniela Zutha, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 26. 6. 2020

.....

Zářecký Tomáš

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ÚDRŽBA	17
2.1	Typy údržby	17
2.2	Vývoj údržby	18
3	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA	19
4	VIBRODIAGNOSTIKA	21
4.1	Charakteristika vibrací	21
4.2	Budící síla	21
4.2.1	Periodická budící síla	22
4.2.2	Impulsní budící síla	23
4.2.3	Budící síla náhodného průběhu	24
4.3	Měřené veličiny	24
4.4	Snímače vibrací	25
4.4.1	Snímače výchylky vibrací	25
4.4.2	Snímače rychlosti vibrací	26
4.4.3	Snímače zrychlení vibrací	26
4.4.4	Montáž snímačů	27
4.5	Zpracování signálu	28
4.6	Analýza signálu	29
4.6.1	Analýza signálu v časové oblasti	29
4.6.2	Analýza signálu ve frekvenční oblasti	29
5	ON-LINE MONITOROVACÍ SYSTÉMY	33
5.1	On-line monitorovací systémy ADASH	33
5.1.1	A3900-II	33
5.1.2	A3800	34
5.1.3	A3716	34
5.2	On-line monitorovací systémy ifm electronic	35
5.2.1	VSE002 a VSE100	35
5.2.2	VSE150, VSE151, VSE152, VSE153	35
5.3	On-line monitorovací systémy SKF	36
5.3.1	SKF Multilog IMx-C	36
5.3.2	On-line systém SKF Multilog IMx-S	36
5.3.3	On-line systém SKF Multilog IMx-W	37
5.3.4	On-line systém SKF Multilog IMx-8	37
5.4	On-line monitorovací systém 4dot	38
5.4.1	Chipmunk 1.0	38
5.5	Diagnostický systém 4dot	39
5.6	Porovnání vybraných monitorovacích systémů	40
6	OBŘÁBĚNÍ	43
6.1	Frézování	43
6.1.1	Základní vzorce řezných podmínek	43
6.2	Kmitání při obrábění	43
6.2.1	Vlastní kmitání	44
6.2.2	Vynucené kmitání	44
6.2.3	Samobuzené kmitání	44

7	POPIS MĚŘENÍ	45
7.1	Použitý obráběcí stroj	45
7.2	Měřicí aparatura.....	46
7.2.1	CTC AC244-1D	46
7.2.2	PCB 356B18.....	47
7.2.3	NI 9234.....	48
7.3	Umístění akcelerometrů.....	48
7.4	Postup měření	49
7.5	Popis vyhodnocení kvality povrchu	50
7.5.1	Vybrané profilové parametry drsnosti povrchu	51
7.5.2	Vybrané plošné parametry drsnosti povrchu.....	53
8	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	55
8.1	Vyhodnocení vibrací	55
8.1.1	Čelní frézování	56
8.1.2	Frézování hran.....	59
8.1.3	Frézování obdélníkové kapsy	61
8.1.4	Frézování kruhové kapsy	65
8.2	Vyhodnocení kvality povrchu	67
8.2.1	Měření 1	67
8.2.2	Měření 2	68
8.2.3	Měření 3	69
8.2.4	Měření 4	70
9	ZHODNOCENÍ.....	73
9.1	Zhodnocení výsledků měření vibrací	73
9.1.1	Měření pomocí monitorovacího systému SKF Multilog IMx-8	73
9.1.2	Měření pomocí měřicí karty NI 9234.....	74
9.2	Zhodnocení výsledků měření kvality povrchu	74
9.3	Shrnutí dosažených výsledků	75
10	ZÁVĚR.....	77
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	79
12	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	83
12.1	Seznam tabulek.....	83
12.2	Seznam obrázků.....	83
13	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

1 ÚVOD

Během provozu jakéhokoliv strojního zařízení se vyskytují vibrace, které mnohdy dopředu signalizují vznikající nebo rozvíjející se závadu. Díky tomu je možné závady odhalit v jejich počáteční fázi a provést potřebné úkony k jejich odstranění, čímž se zamezí neočekávaným odstávkám strojů, případně se zabrání poškození dalších částí stroje, které nadále zůstanou v provozuschopném stavu. Takovému způsobu kontroly strojů během jejich provozu se říká vibrační diagnostika, nebo také vibrodiagnostika. Vibrodiagnostika je v dnešní době samostatný neustále se rozvíjející obor technické diagnostiky, jehož využití má v praxi mnoho podob. Vývoj vibrační diagnostiky je úzce spjat s rozvojem elektrotechniky, automatizace, elektroniky a výpočetní techniky. Tento rozvoj zejména v posledních letech způsobuje také snížení pořizovacích nákladů diagnostických přístrojů.

Tato práce se zaměřuje na on-line monitorovací systémy, které jsou založeny na nepřetržitém sledování stavu strojů. Pro monitorování jsou využívány trvale instalovaná zařízení, která kontinuálně sledují stroj a oproti diagnostickým systémům, které nejsou trvale instalovány na monitorovaném objektu umožňují okamžité rozpoznání náhlého zhoršení kontrolovaných parametrů a provedení předem zvolených úkonů po přesažení definovaných mezí, například spuštění varovné signalizace, odeslání varovného hlášení, nebo přerušení chodu stroje, dále také umožňují provádět diagnostikování a vyhodnocování naměřených dat dálkově, zálohovat velké množství naměřených dat, ve kterých je možné zpětně vyhledávat (například podmínky při kterých byl vyroben určitý výrobek), případně tato data analyzovat.

Práci je možné rozdělit na dvě hlavní části, teoretickou a praktickou, přičemž obě hlavní části jsou rozděleny do několika kapitol. Teoretická část této diplomové práce nejdříve popisuje typy a vývoj údržby, technickou diagnostiku a zejména vibrodiagnostiku. Jsou popsány jednotlivé druhy budících sil vibrací, možné měřené veličiny, typy snímačů vibrací, a také zpracování a analýza signálu. Na popis vibrační diagnostiky navazuje popis vybraných on-line monitorovacích systémů několika výrobců, a také vzájemné porovnání několika zástupců z těchto on-line monitorovacích systémů. V další části této práce jsou popsány teoretické základy frézování a kmitání, s kterými je možné se setkat během obrábění. Kmitání jednotlivých prvků obráběcího systému může mít negativní vliv na kvalitu obrobene plochy, intenzitu opotřebení nástroje, nebo na opotřebení jednotlivých součástí obráběcího stroje. Následující část práce se zabývá popisem provedeního měření a všech částí potřebných k provedení tohoto měření, tedy obráběcího stroje a měřicí aparatury včetně popisu umístění senzorů.

V rámci praktické části této práce je provedeno experimentální měření vibrací vřetene obráběcího centra MCV 754 Quick během obrábění dvou shodných testovacích vzorků, přičemž jeden vzorek je obráběn ideálními řeznými podmínkami a druhý neideálními řeznými podmínkami. Cílem tohoto měření je ověřit schopnost posouzení kvality obráběcího procesu pomocí naměřených vibrací vřetene obráběcího zařízení. Nejedná se tedy o odhalení určité závady diagnostikovaného zařízení, ale o ověření schopnosti rozpoznat rozdíly mezi vibracemi získanými během jednotlivých obrábění prováděných odlišnými řeznými podmínkami. Dále je z důvodu ověření vlivu použitých podmínek obrábění na kvalitu povrchu obrobků vyhodnocena kvalita povrchu testovacích vzorků pomocí bezdotykového 3D profilometru Taylor Hobson Talysurf CCI Lite.

Při obrábění neideálními řeznými podmínkami je očekáváno naměření vyšších vibrací oproti vibracím naměřeným při obrábění ideálními podmínkami. Dále je očekáván vliv vyšších vibrací při obrábění neideálními podmínkami na kvalitu obráběného povrchu testovacího vzorku. Tento vliv vyšších vibrací by se měl projevit při porovnání vyhodnocovaných profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu obou testovacích vzorků nižší kvalitou povrchu vzorku obráběného neideálními podmínkami.

2 ÚDRŽBA

Údržba je normou ČSN EN 13306:2017 definována jako „kombinace všech technických, administrativních a manažerských zásahů během životního cyklu objektu zaměřených na jeho udržení ve stavu, v němž může vykonávat požadovanou funkci, nebo jeho navrácení do tohoto stavu.“ [1]

V současné době není hlavní úlohou údržby pouze opravovat poškozené stroje a udržovat je ve stavu, kdy jsou schopné plnit požadovanou funkci, jak tomu bylo dříve, ale navíc poruchám předcházet a snažit se o to, aby práce strojů byla efektivní, spolehlivá a bezpečná. Hlavními cíli údržby jsou zajištění bezpečnosti provozu, optimalizování výkonnosti stroje a dosažení nejvyšší možné produktivity. [2]

2.1 Typy údržby

Údržba se neustále vyvíjí a existuje několik jejích typů. Rozdělení je zobrazeno na obr. 1). Prvním typem je údržba reaktivní neboli po poruše. Jak je z názvu patrné, jedná se o typ údržby, kdy je po zjištění poruchového stavu požadováno co nejrychlejší navrácení do stavu schopného plnit požadovanou funkci. Tento typ údržby je využíván zejména u malých, levných a zálohovaných zařízení. [2]

Druhým typem je údržba, která se snaží předcházet poruchám. Preventivní údržba je založena na snížení pravděpodobnosti poruchy objektu, provádí se v pravidelných intervalech, které se určí na základě četností poruch podobných zařízení. [2]

Prediktivní údržba využívá monitorování a diagnostikování stavu stroje, díky čemuž předchází poruchám a neočekávaným odstavením objektu a umožňuje provést opravu až když to stav stroje potřebuje. Hlavními výhodami jsou možnost dopředu naplánovat odstávku na vhodný termín, zvýšení životnosti objektu, snížení nákladů. [2]



Obr. 1) Typy údržby. [1]

Proaktivní údržba je typ údržby, který souvisí s předchozím uvedeným druhem, ale navíc řeší příčinu zhoršeného stavu objektu. Náprava spočívá ve vyřešení základní příčiny, nikoliv pouze aktuálního symptomu závady. [2]

Zjišťování aktuálního stavu objektu prediktivní a proaktivní údržbou obnáší důkladné měření v době, kdy je objekt v bezporuchovém stavu pro stanovení referenčních hodnot, pravidelné monitorování např. vibrační definovaných míst, detekce přesažení poplachových mezí, zjištění příčiny problému a následné doporučení nápravy. [2]

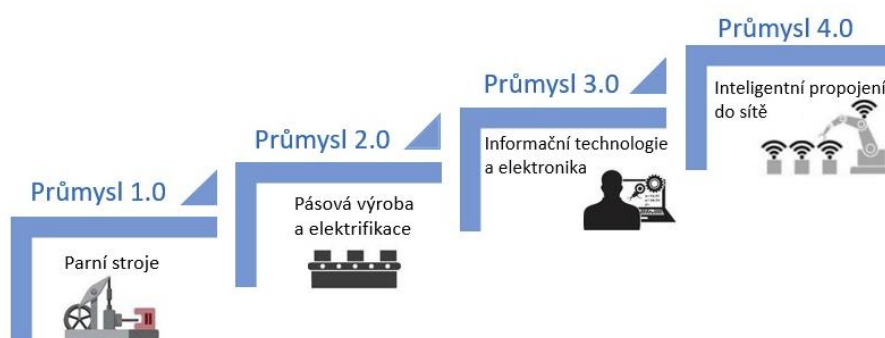
2.2 Vývoj údržby

Zmínky o údržbě se vážou již k období, kdy si člověk začal vyrábět nástroje a potřeboval si je také opravovat. Od té doby uplynula dlouhá doba, po kterou se údržba vyvíjela a měnily se požadavky na ni kladené. Období do 40. let 20. století je označováno jako 1. generace, kdy převažovala reaktivní údržba neboli údržba po poruše. Pro druhou generaci (70. léta) je charakteristická preventivní údržba. Poslední generace, kterou popsal John Moubray je známá jako období rozvoje prediktivní údržby. [3]

Posledních několik let je stále častěji zmiňován výraz Industry 4.0 (v České republice Průmysl 4.0). Tento výraz označuje 4. generaci údržby, která je spojená se 4. průmyslovou revolucí. [4]

Čtvrtá průmyslová revoluce zahrnuje zejména digitalizaci a integraci jednoduchých až komplexních výrobně – obchodních vztahů či řetězců, digitalizaci produkce a nabídky služeb, a také nové obchodní modely. [4]

Tato nová éra výroby nese mnoho podobností s dřívějšími revolucemi, nové technologie zakládá na minulosti, automatizuje a zefektivňuje manuální fragmentované procesy pracovních postupů. Vývoj průmyslových generací je zobrazen na obr. 2). [5]



Obr. 2) Vývoj průmyslových generací. [6]

Průmysl 4.0 se zaměřuje na rozvoj inteligentní továrny, základem je transformace produktů do kyberneticko-fyzikálního systému (CPS – cyber-physical system). CPS systémy jsou všechny objekty s nimiž se lze setkat ve výrobě, například materiál, stroje a zařízení, roboti, snímače, dopravníky, logistika. Tyto objekty spojuje komunikační síť, kterou prostřednictvím IoT¹ navzájem komunikují. Pomocí internetu věcí je dosaženo vysoké adaptability a výkonnosti zdrojů, času a spotřeby energie. [7]

¹ Internet věcí (Internet of Things)

3 TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Technická diagnostika je v současnosti velmi rozsáhlým oborem, který se většinou zabývá bezdemontážními a nedestruktivními metodami a prostředky stanovení technického stavu objektu. Bez technické diagnostiky by nebylo možné provádět prediktivní a proaktivní údržbu, jejichž efektivnost a účinnost je závislá na kvalitě diagnostiky. Pomocí metod technické diagnostiky je možné určit okamžitou spolehlivost sledovaného stroje či zařízení. [8]

Slovo diagnostika pochází z řeckého slova DIA-GNOSIS, které znamená „skrze poznání“. Původně byl tento pojem převzat pro lékařství, konkrétně pro označení vyšetření pacienta lékařem, později se však rozšířil i do technických aplikací. [9]

Úkolem diagnostických systémů je vyhodnocovat technický stav objektu, jsou tvořeny diagnostickými prostředky, diagnostickým objektem a obsluhou. Diagnostickými prostředky je myšlen soubor technických zařízení, postupů, metod pro analýzu a vyhodnocení technického stavu objektu. [10]

Diagnostické systémy pracují kromě pojmu diagnózy také s prognózou a genezí. Diagnóza označuje vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu. Základními úkoly diagnostiky jsou detekce a lokalizace vady nebo poruchy. Prognóza označuje predikci do budoucnosti a geneze analýzu možných a pravděpodobných příčin vzniku vady nebo poruchy. [9]

Diagnostické prostředky jsou děleny na OFF-LINE a ON-LINE. OFF-LINE jsou obvykle používány jako malé přenosné přístroje pro sběr dat za provozu, která se analyzují později na externím pracovišti. ON-LINE prostředky slouží pro diagnostikování a vyhodnocování při provozu. Systém trvale připojený k diagnostikovanému objektu pro průběžné nebo pravidelné sledování technického stavu objektu a vyhodnocování vad nebo mezních stavů je označován jako monitorovací systém. [9]

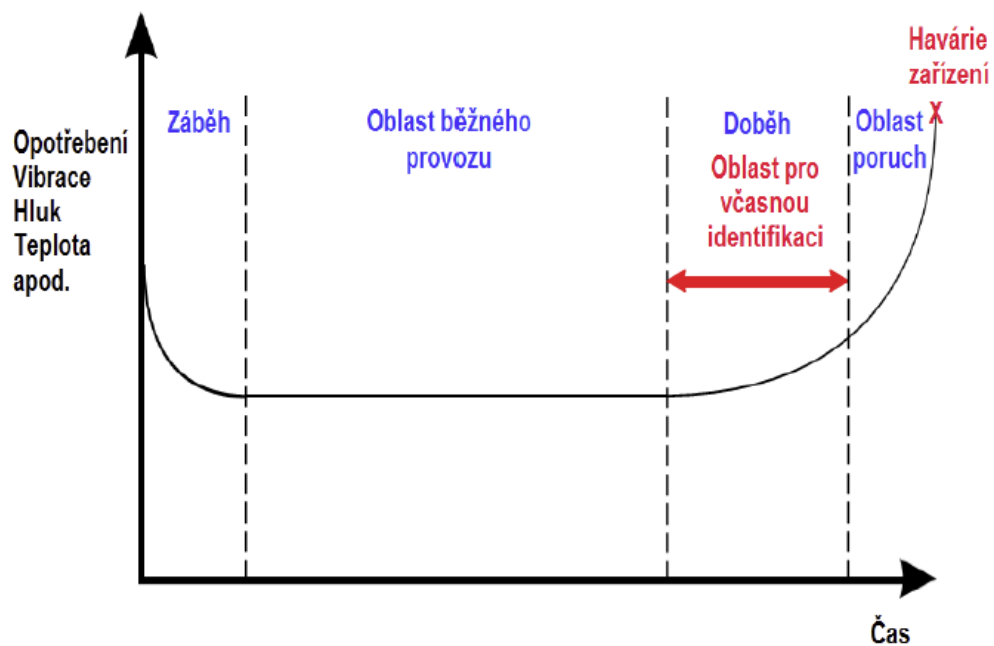
Diagnostiku je možné rozdělit na několik metod podle druhu analyzovaných parametrů nebo měřených veličin. Jednou z nejvíce používaných je vibrodiagnostika, která využívá zpracování a analyzování vibračního signálu pro vyhodnocení stavu. Dalšími metodami jsou například tribodiagnostika, termodiagnostika, akustická diagnostika a elektrodiagnostika. [11]

Různé metody technické diagnostiky mohou dávat také odlišné výsledky. Pro různé objekty a podmínky provozu není možné použít některé metody, případně jsou jejich výsledky zkreslené až zavádějící. Pro zpřesnění vyhodnocení technického stavu strojních zařízení je využívána tzv. multiparametrická diagnostika, která kombinuje jednotlivé metody diagnostiky. [11]

Postupný časový průběh opotřebení, označovaný jako vanová křivka je vidět na obr. 3). Tato křivka rozděluje průběh opotřebení na oblasti záběhu, kdy dochází na začátku provozu vzájemným záběhem jednotlivých součástí k značnému opotřebení, oblast běžného provozu, kdy je opotřebení ustálené na běžném provozním opotřebení a oblast doběhu, což je poslední fáze, kdy dochází k růstu opotřebení a intenzity poruch. Při neodhalení rozvíjející se poruchy dojde k havárii celého zařízení. [11]

Vývoj opotřebení je možné sledovat například pomocí vibrodiagnostiky, kdy je sledován průběh vibrací. Při použití vhodných metod je možné odhalit a včas upozornit na vznikající poškození, nebo dokonce poškození, jehož projev ještě není možné na povrchu

sledovat, protože teprve vzniká pod povrchem (spojují se mikrotrhliny). Takováto poškození lze odhalit například pomocí vysokofrekvenčních metod. [11]



Obr. 3) Vanová křivka průběhu opotřebení. [11]

4 VIBRODIAGNOSTIKA

Zařízení, která pro plnění své funkce využívají rotační, posuvný nebo jiný pohyb, produkují během svého provozu vibrace, jejichž velikost a projev závisí na pracovních podmínkách a také na technickém stavu zařízení. Cílem sledování vibrací je určit technický stav zařízení a závady odhalit na počátku jejich vzniku. [11]

Vibrace jsou u rotujících strojů spojena s dynamickým namáháním, stavem ložisek, převodovek, nevyvážeností, nesouosostí, trhlinami ve významných komponentách, opotřebováním, únavou materiálů, korozi atd. Právě proto je monitorování a vyhodnocování vibrací základní a významnou metodou technické diagnostiky. [9, 10]

4.1 Charakteristika vibrací

V rámci vibrační diagnostiky je signál způsobený vibracemi nositelem informací, určuje příčinu vzniku vibrací. Jak již bylo zmíněno, analyzováním tohoto signálu vhodnými metodami je možné odhalit vznikající nebo rozvíjející se závadu. [2]

Vibrace jsou normou ČSN ISO 2041 definovány jako „*mechanické kmitání kolem rovnovážné polohy; kmitání může být periodické nebo náhodné*“. Kmitání je touto normou definováno jako „*kolísání velikosti veličiny, obvykle v čase, vzhledem ke stanovené referenci, je-li velikost veličiny střídavě větší a menší než stanovená reference*“. [12]

Mechanické kmitání je dynamický jev, který je vždy způsoben budící silou, jejíž působení může být externí nebo interní. Tuhým tělesem je v rámci technické diagnostiky myšlen celek nahrazený jediným hmotným bodem. V jednom časovém okamžiku je pohyb všech částí tělesa shodný. [9]

Budící síla, její směr a kmitočet určuje veličiny mechanických vibrací a také jejich hodnoty. Amplituda a fáze v daném časovém okamžiku popisují vibrace. Mechanický systém má šest stupňů volnosti, takže pomocí kombinace šesti pohybů (posun v pravouhlé soustavě souřadnic x , y , z a rotace kolem os x , y , z) jsou určeny vibrace tělesa. Hodnota tuhosti velké části mechanických systému nebývá nekonečně velká a nezávislá na kmitočtu, takže těleso nekmítá jako jeden bod a vznikají vlny. [9]

Vlna je označení pro šíření kmitů v prostoru, je možné ji specifikovat jako změnu fyzikálního stavu nebo vlastností prostředí. V tomto prostředí se vlna šíří a přenáší energii, k přemísťování prostředí ale nedochází. [9]

Vibrace strojů souvisí s jejich dynamickým namáháním a technickým stavem jednotlivých komponent, jak je zmíněno na začátku této kapitoly. Buzení vibrací je způsobeno rotujícími i přímočaře se pohybujícími tělesy. Další možností jsou tzv. rázy, kdy střetem dvou vzájemně se pohybujících těles dochází k přechodovému kmitavému jevu, který v tělese generuje postupnou rázovou vlnu. [9]

4.2 Budící síla

Charakter vibrací souvisí s druhem budící síly. Základní typy budící síly jsou periodická budící síla, impulsní budící síla a budící síla náhodného průběhu. [2]

4.2.1 Periodická budící síla

Při působení pouze periodické budící síly je i vibrační odezva periodická. Periodické vibrace je možné popsat jako kmitavý pohyb částice nebo tělesa kolem referenční polohy, přičemž pohyb se opakuje přesně po určitých časových dobách. Nejjednodušší formou periodických vibrací je tzv. harmonický pohyb, který při vykreslení jako funkce času je reprezentován sinusovou křivkou. Harmonické kmitání s vyznačením maximální amplitudy, střední kvadratické a absolutní hodnoty je zobrazeno na obr. 4). Většinu skutečných sil, s kterými je možné se setkat v oblasti rotačních strojů je možné vyjádřit jako součet harmonických sil. Harmonickou sílu je možné vyjádřit rovnicí (1). [2, 13]

$$f(t) = F \times \sin(\omega t + \varphi_F) \quad (1)$$

Kde:

F ...amplituda budící síly [N]

ω ...úhlová frekvence budící síly [rad/s]

t ...čas [s]

φ_F ...počáteční fázový posuv budící síly

Výchylka kmitání je popsána rovnicí (2). [10, 11]

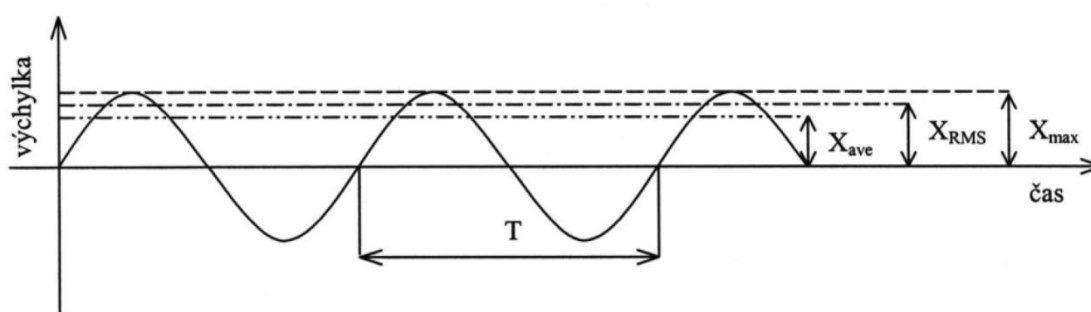
$$x = X_{max} \times \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{max} \times \sin(2\pi \times f \times t) = X_{max} \times \sin(\omega t) \quad (2)$$

Kde:

f ...frekvence kmitání [Hz]

T ...perioda kmitání [s]

X_{max} ...maximální výchylka – amplituda kmitání [mm]



Obr. 4) Harmonické kmitání s vyznačením maximální amplitudy, střední kvadratické a absolutní hodnoty. [10]

Pro popis harmonického signálu se používají i jiné charakteristiky, než je amplituda kmitání, jak je vyznačeno na obr. 4). Střední absolutní hodnota vibrací je vyjádřena rovnicí (3). Střední kvadratická hodnota vibrací vyjádřena rovnicí (4) je také označována jako hodnota efektivní,

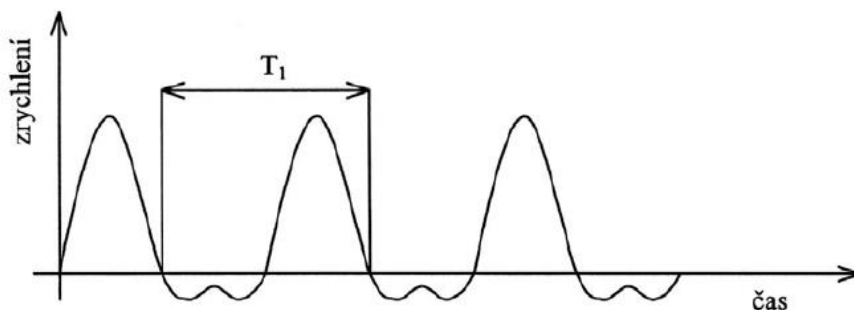
nebo RMS^2 a je významná díky tomu, že obsahuje informaci o výkonu kmitání. Rovnice (5) vyjadřuje střední kvadratickou hodnotu pro harmonický pohyb. [10, 11]

$$X_{ave} = \frac{1}{T} \times \int_0^T |x| dt \quad (3)$$

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \times \int_0^T x^2 dt} \quad (4)$$

$$X_{RMS} = \frac{\pi}{2 \times \sqrt{2}} \times X_{ave} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times X_{max} \quad (5)$$

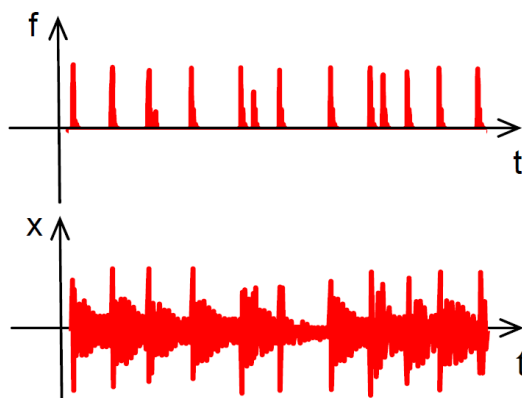
Většina vibrací, s kterými je možné se setkat není čistě harmonickým pohybem, většinu však lze charakterizovat jako periodický pohyb. Příklad typického neharmonického periodického pohybu je zobrazen na obr. 5). [13]



Obr. 5) Neharmonický periodický pohyb. [10]

4.2.2 Impulsní budící síla

Působením impulsní síly je těleso vychýleno z rovnovážné polohy. Po tomto vychýlení následuje volné kmitání na jedné či více vlastních frekvencích. Příklad kmitání vyvolaného impulsní budící silou je zobrazen na obr. 6). S rázovým buzením je možné se setkat při závadách valivých ložisek, nebo u zkoušek a testů, kdy je využíváno záměrné rázové buzení. [2]

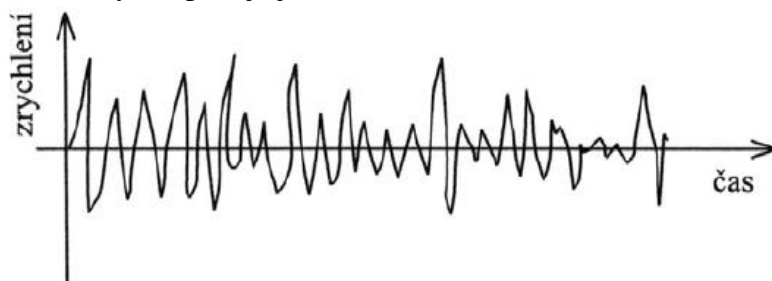


Obr. 6) Volné kmitání vyvolané impulsní budící silou. [2]

² root mean square value

4.2.3 Budící síla náhodného průběhu

Při působení budící síly náhodného průběhu je odezva také náhodná. Navíc mohou být vybuzeny vlastní frekvence, podobně jako u impulsního buzení. Náhodné buzení je vždy přítomné, zejména jako šum a je zapotřebí s ním při vibrační diagnostice počítat. Příklad náhodného kmitání, jehož průběh se nikdy neopakuje je zobrazen na obr. 7). [2, 10]



Obr. 7) Náhodné kmitání. [10]

4.3 Měření veličiny

Veličiny měřené v rámci vibrační diagnostiky souvisí s veličinami, které v mechanice popisují pohyb. Ten je možné popsat dráhou (výhylkou), rychlostí nebo zrychlením. [2]

Pro výhylku vibrací byl uveden vztah (2). Rychlost kmitání je popsána rovnicí (6), zrychlení kmitání rovnicí (7). [10, 11]

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \times X_{max} \times \cos(\omega t) = V_{max} \times \cos(\omega t) = V_{max} \times \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

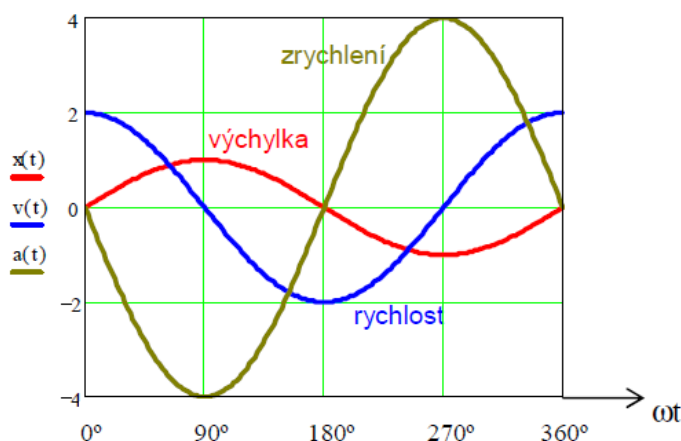
$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \times X_{max} \times \sin(\omega t) = -A_{max} \times \sin(\omega t) = A_{max} \times \sin(\omega t + \pi) \quad (7)$$

Kde:

V_{max} ...maximální rychlost – amplituda rychlosti [$\text{mm} \times \text{s}^{-1}$]

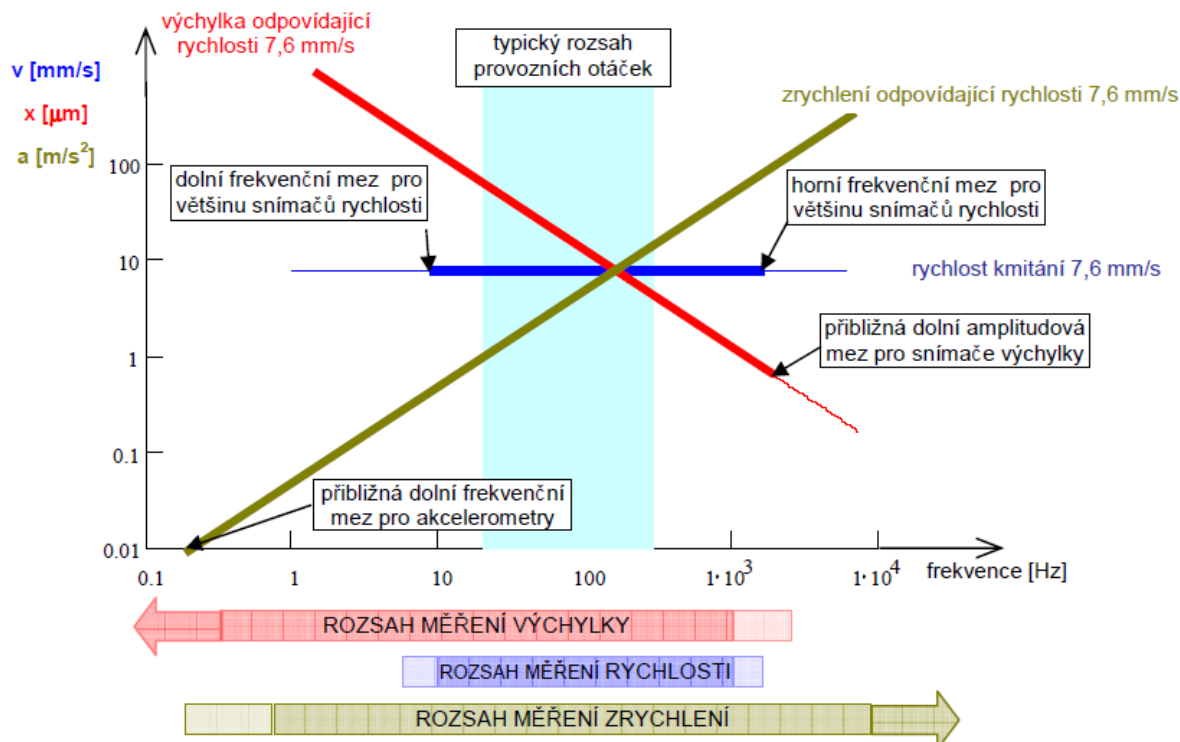
A_{max} ...maximální zrychlení – amplituda zrychlení [$\text{mm} \times \text{s}^{-2}$]

Jak je z rovnic patrné, všechny tři veličiny jsou vzájemně vázány matematickými vztahy a při znalosti kterékoliv z nich je možné snadno zjistit zbývající. Vztah mezi jednotlivými veličinami je zobrazen na obr. 8), kde $X = 1 \text{ mm}$ a $\omega = 2 \text{ rad/s}$. [2]



Obr. 8) Vztah mezi výhylkou, rychlostí a zrychlením. [2]

Při měření je zapotřebí uvažovat negativní vlivy, které ovlivňují přesnost měření. Je to především šum, který je při měření vždy přítomný a největší nepřesnost měření způsobuje u slabých signálů. Jak je patrné z omezení použití měřících veličin zobrazeném na obr. 9), pro měření v rozsahu frekvencí 10 Hz až 1000 Hz je volena jako měřená veličina rychlost, pro nižší frekvence výchylka a pro vyšší frekvence zrychlení. [2]



Obr. 9) Omezení použití měřících veličin. [2]

4.4 Snímače vibrací

Snímače určené pro sledování vibračního stavu je možné rozdělit na dva základní typy podle stejného principu jako se dělí vibrace na absolutní a relativní. Absolutní vibrace tělesa vyjadřují pohyb tělesa vztažený ke gravitačnímu poli zeměkoule (pevný bod), relativní vibrace tělesa jsou vztaženy k vybranému skutečnému bodu (např. určitá část nebo základ stroje), který se může také pohybovat. [9]

Pro měření míry absolutních vibrací konstrukce jsou používány seismická zařízení připevněná na konstrukci stroje. Snímače relativní výchylky měří relativní vibrační výchylky mezi částmi stroje, které rotují a nerotují. [11]

Snímače je možné dělit také podle typu měřené veličiny na snímače výchylky, snímače rychlosti a snímače zrychlení (akcelerometry). [11]

4.4.1 Snímače výchylky vibrací

Senzory výchylky (polohy, posunutí) je možné sestavit mnoha způsoby, které jsou založeny např. na principu indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém nebo optickém. V současnosti se ve vibrační diagnostice nejčastěji využívá indukčnostních snímačů. Tyto snímače využívají závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. [14]

Kvůli vysokofrekvenčnímu principu je měření závislé na celkovém odporu. Kabeláž sloužící pro vedení vysokofrekvenčního signálu je vyráběna s přísnou tolerancí jednotlivých

složek celkového odporu a také se nesmí měnit její délka. Senzory jsou dodávány pouze pro konkrétní materiál měřeného povrchu a není možné je použít pro jiný. [2]

Snímače výchylky obvykle slouží pro měření relativních vibrací rotujících hřídelů vůči určitému statoru, kterým mohou být např. ložiska. [2]

4.4.2 Snímače rychlosti vibrací

Senzor rychlosti vibrací je seismické zařízení, které funguje na principu využití elektromagnetické indukce. V cívce se při pohybu v magnetickém poli permanentního magnetu, který tvoří seismickou hmotu snímače indukuje elektrické napětí, které je způsobeno přenosem energie z magnetického pole do cívky. Velikost výstupního napětí je přímo úměrná rychlosti vibrací. Konstrukce senzorů rychlosti je uzpůsobena tomu, aby relativní rychlost korespondovala s rychlostí vibrací měřeného stroje. [2, 11, 14]

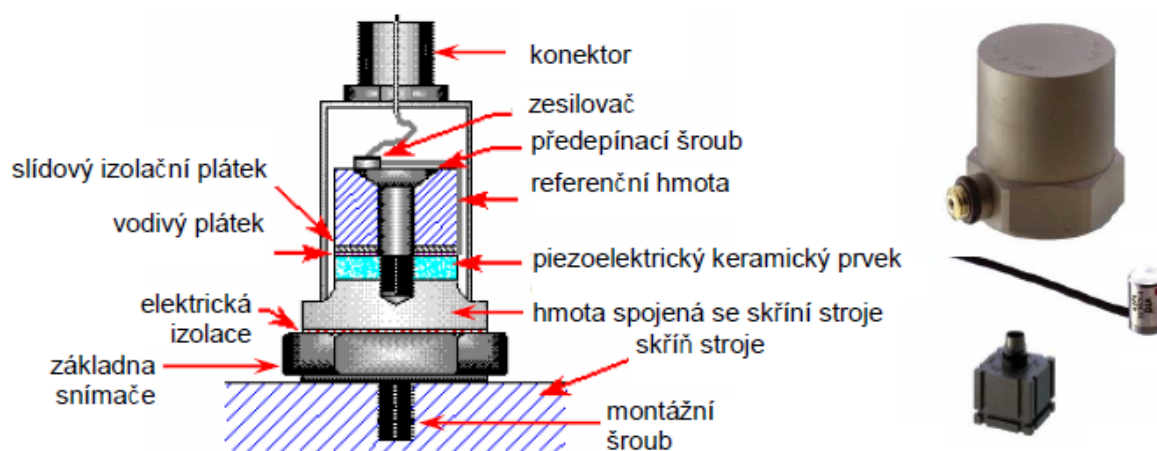
Mechanické parametry součástí snímače rychlosti určují frekvenční rozsah, ve kterém je možné snímač použít. Odezvu senzoru na nízkých frekvencích určují zejména tuhost pružin, materiálové tlumení pružin a hmotnost cívky s jádrem. Vlastní (rezonanční) frekvence snímačů tohoto typu bývá mezi 5 až 10 Hz. Měření kmitavého pohybu je možné nad vlastní frekvencí do horní hranice použitelnosti, která je maximálně 3,5 kHz. [2, 9, 14]

Dalšími nevýhodami těchto snímačů jsou citlivost na parazitní magnetická pole a větší rozměry. V současnosti se rychlost vibrací obvykle určuje integrováním signálu získaného senzory zrychlení. [9, 14]

4.4.3 Snímače zrychlení vibrací

Snímače zrychlení jsou díky jednoduché konstrukci a nižší ceně nejpoužívanějšími snímači vibrací. Měřenou veličinou je zrychlení, v případě potřeby je možné ji převést na výchylku nebo rychlost, jak již bylo zmíněno. Akcelerometry je možné realizovat pomocí velkého množství fyzikálních principů, mezi nejznámější patří piezoelektrický, piezorezistivní, kapacitní, s elektromechanickou zpětnou vazbou atd. [9, 11]

Nejvíce užívaným typem senzorů vibrací je piezoelektrický akcelerometr, který je zobrazen na obr. 10). Podstatou tohoto senzoru je přímý piezoelektrický jev, kdy vzniká elektrický náboj při deformaci jednoho nebo více piezoelektrických krystalových elementů. Velikost elektrického náboje je přímo úměrná deformaci. [10, 11]



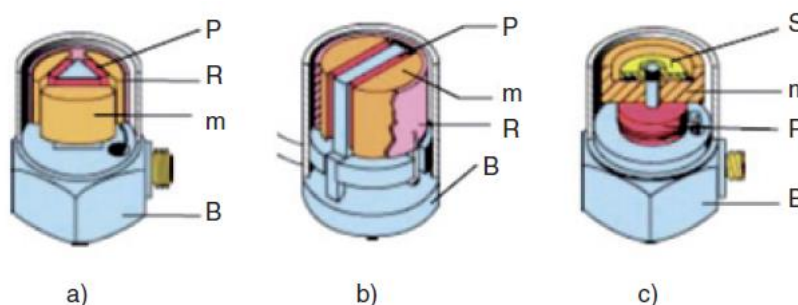
Obr. 10) Snímač zrychlení. [2]

V závislosti na poloze piezoelektrického krystalu a hmoty uvnitř snímače se akcelerometry dělí na tři typy, a to tlakové, ohybové a smykové. Na obr. 11) je zobrazeno konstrukční uspořádání jednotlivých typů piezoelektrických akcelerometrů. [2, 10]

Delta Shear® (obr. 11a) je v současnosti jedním z nepoužívanějších piezoelektrických akcelerometrů využívaných pro měření absolutních vibrací. Jedná se o smykový typ akcelerometru, který má tři dvojice piezokrystalů a setrvačných hmot. Tyto dvojice jsou připevněny k trojbokému středovému sloupku s použitím předepnutého prstence. Akcelerometry tohoto typu mají dostatečnou citlivost, jsou odolné a také se u nich neobjevují nevýhody tlakového typu akcelerometru. [2, 14]

Planar Shear je konstrukce podobná předchozímu typu, je použito o jednu dvojici krystalů a setrvačných hmot méně na plochém středovém sloupku (obr. 11b). Jedinou nevýhodou oproti Delta Shear® je menší citlivost. [14]

Akcelerometr s centrálním tlakovým namáháním (obr. 11c) má jednoduchou konstrukci, kdy je jedna dvojice piezoelektrického krystalu a setrvačné hmoty namontována na válcovém středovém nosníku s využitím předepjaté pružiny ve tvaru disku. Hlavní nevýhodou této konstrukce je ovlivnění výstupního signálu namáháním a změnou tvaru základny senzoru. Toto ovlivnění je možné kompenzovat pomocí speciálních materiálů, ale nejistota měření je stále vyšší než u předchozích typů akcelerometrů. Snímače tohoto typu mají menší citlivost, vyšší hmotnost setrvačné hmoty a využívají se spíše pro vyšší amplitudy chvění a rázů. [14]



Obr. 11) Konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelerometrů: a) Delta Shear®, b) Planar Shear, c) s centrálním tlakovým namáháním (B – těleso snímače, m – seismická hmota, P – piezoelektrický prvek, R – předpínací prstenec, S – předpínací disk). [14]

Při výběru akcelerometrů pro konkrétní aplikaci je zapotřebí vzít v úvahu parametry akcelerometrů a podmínky prostředí, ve kterých mají být použity. Pro všeobecné použití se provádí výběr požadované citlivosti a zda má akcelerometr horní nebo boční konektor, řada akcelerometrů má však své vlastnosti přizpůsobeny konkrétní aplikaci. [13]

Základní parametry, které je nutné brát v úvahu jsou teplotní rozsah použitelnosti senzoru, dynamický a frekvenční rozsah akcelerometru, citlivost, úroveň elektrického a elektromagnetického rušení v použité oblasti a také poměr hmotnosti měřeného objektu a hmotnosti akcelerometru. [11]

4.4.4 Montáž snímačů

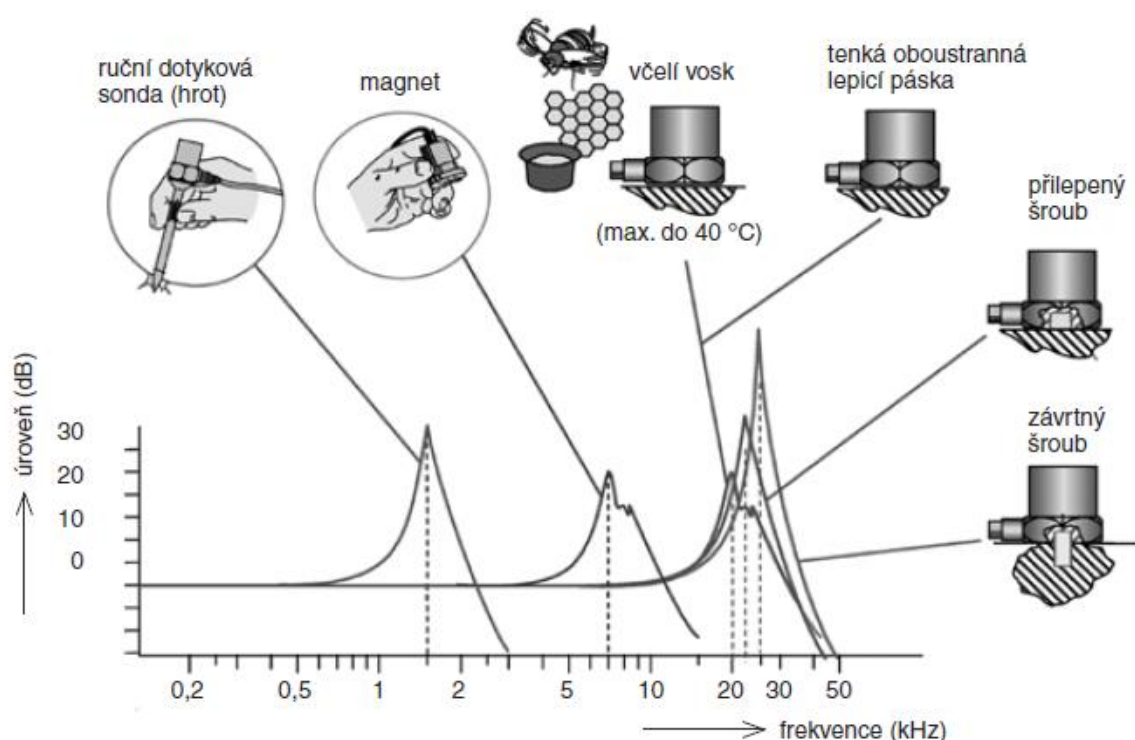
Důležitou součástí měření je umístění a způsob montáže snímačů. Nesprávné připevnění snímače způsobí znehodnocení naměřených dat či přinejmenším výrazné omezení užitečného frekvenčního rozsahu snímače. Správným upevněním se tedy snažíme o to, aby snímač měřil

to, co se s měřeným objektem skutečně děje. Připevnění snímačů je možné realizovat několika způsoby, ty nejpoužívanější jsou popsány v následujících odstavcích. [2, 13]

Ideální připevnění je pomocí šroubu na rovný a hladký povrch. Montážní tuhost je obvykle možné zlepšit nanesením tenké vrstvy maziva na montážní povrch před utažením akcelerometru. Díra se závitem musí být dostatečně hluboká. [13]

Připevněním pomocí speciálních lepidel nebo včelího vosku se dosahuje také velice dobrých frekvenčních rozsahů, které jsou pouze mírně sníženy. [13, 14]

Rychlým, méně spolehlivým a používaným způsobem je připevnění oboustrannou lepicí páskou. Uchycení senzoru pomocí magnetu je často využíváno, avšak pouze do frekvenčního rozsahu přibližně 2 kHz. Pro orientační měření do frekvenčního rozsahu 1 kHz je používána ruční doteková jehla. Vliv uvedených způsobů přichycení snímače na amplitudovou frekvenční charakteristiku je zobrazen na obr. 12). [2]



Obr. 12) Vliv způsobů přichycení snímače na amplitudovou frekvenční charakteristiku. [14]

4.5 Zpracování signálu

Pro měření a následnou analýzu vibrací je zapotřebí určité technické vybavení, které to umožňuje. Využívají se různá zařízení, od jednoduchých měřidel celkových hodnot vibrací až po multifunkční vícekanálové analyzátoři. [2]

Funkce většiny analyzátorů je založena na podobném principu, kdy je nejdříve pomocí senzorů zaznamenán vstupní analogový signál, který dále postupně prochází vstupním zesilovačem, antialiasingovým filtrem a analogově-číslicovým převodníkem, který převádí signál na číslicový (digitalizuje ho). Signál je poté uložen do vyrovnávací paměti, odkud může být zobrazen jeho časový záznam, nebo ho lze zpracovat na frekvenční spektrum. [2, 9]

4.6 Analýza signálu

Cílem diagnostiky není pouze měřit, ale zejména vyhodnocovat aktuální stav zařízení. Pomocí převodu naměřeného analogového signálu do digitální podoby je možné provádět různé druhy analýz. Hlavními dvěma druhy analýz jsou analýza v časové oblasti a analýza ve frekvenční oblasti. [2]

4.6.1 Analýza signálu v časové oblasti

Analýza vibrodiagnostického signálu v časové oblasti je založena na vyhodnocení parametrů časových průběhů signálů určujících veličin. Časová analýza bývá také označována jako tzv. časová historie. V časové oblasti je možné jednoduše vyhodnotit okamžité, střední a efektivní hodnoty signálu nebo obálky signálu. Pokud převažují náhodné složky signálu (náhodné vibrace) využívají se pro analýzu také statistické výpočty, např. směrodatná odchylka, koeficient špičatosti, koeficient šikmosti, činitel výkmitu atd. Pokročilé metody časové analýzy využívají další nástroje, které umožňují lokalizaci místa závady či animaci módů kmitu. [9]

Použití analýzy v časové oblasti je vhodné, pokud existuje jediný nebo alespoň dominantní zdroj vibrací. Pokud tomu tak není, dochází ke ztrátě diagnostické informace v šumu signálu, který je způsoben přenosem vibrací z různých míst strojního komplexu, a tím se omezuje možnost lokalizace příčiny vibrací stroje. [9]

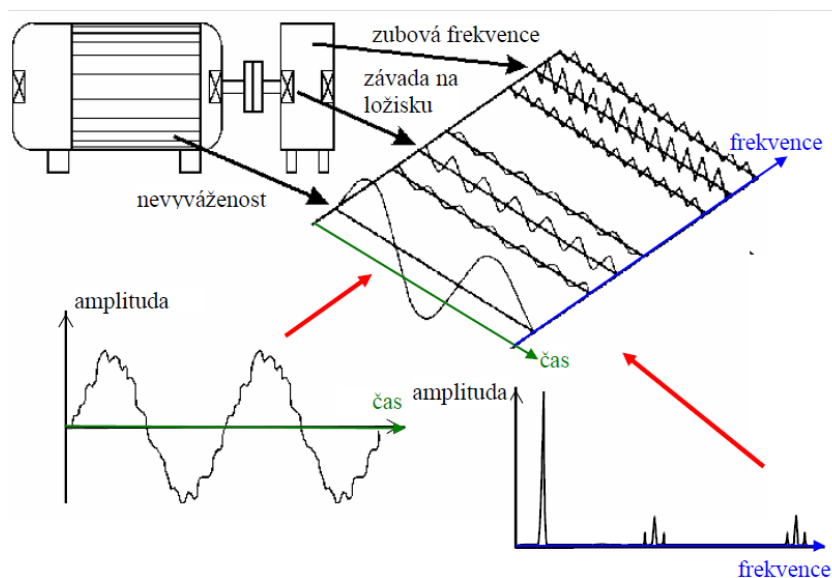
V praxi je využíváno několika metod hodnocení vibrací: [15]

- Špičková (vrcholová) hodnota neboli Peak Level X_{peak} představuje maximální hodnotu sledované veličiny. Špičková hodnota je používána pro popis mechanických rázů a dalších krátkodobých jevů. Tato hodnota poskytuje pouze informaci o přítomnosti špičky v signálu, o průběhu ani frekvenci signálu neposkytuje žádné informace.
- Maximální rozkmit (Peak to Peak) $X_{peak-to-peak}$ je využíván pro posouzení maximálního přípustného mechanického namáhání (např. vůlí konstrukce).
- Střední hodnota (Average Level) X_{ave} je získána pomocí vztahu (3). Slouží k popisu časového průběhu sledovaných vibrací. Nepopisuje žádné důležité fyzikální procesy a v praxi se často nevyužívá.
- Efektivní hodnota (Root Mean Square) X_{RMS} má přímý vztah k energii vibrací a v praxi je často využívána pro hodnocení vibrací. Efektivní hodnota je popsána vztahem (4).
- Činitel výkmitu (Crest Factor) představuje poměr mezi špičkovou hodnotou a efektivní hodnotou. Jelikož tato hodnota roste s rozvojem poškození, je v praxi využívána pro odhalení opotřebení, lomů, trhlin apod.

4.6.2 Analýza signálu ve frekvenční oblasti

Frekvenční analýza je nejčastěji využívaným způsobem analýzy vibrací. Každá časová vlna je složena z příspěvků pocházejících z jednotlivých vibrujících částí, které obvykle vibrují různými frekvencemi. Frekvenční analýza slouží k rozpoznání jednotlivých frekvenčních složek ve vibračním spektru, čímž odstraňuje nevýhody analýzy v časové oblasti a umožňuje lokalizovat vznikající poruchy jednotlivých částí sledovaného objektu. Princip frekvenční analýzy vibračního signálu je zobrazen na obr. 13). [2, 9]

Úplná frekvenční analýza se skládá z amplitudového spektra a fázového spektra, které se využívá k analyzování fázových poměrů mezi jednotlivými komponentami amplitudového spektra. Fázové spektrum je využíváno pro detekci jednotlivých poruch (např. nevyváženosti rotačních částí stroje, nesouososti hřídelů atd.). [9]



Obr. 13) Princip frekvenční analýzy vibračního signálu. [2]

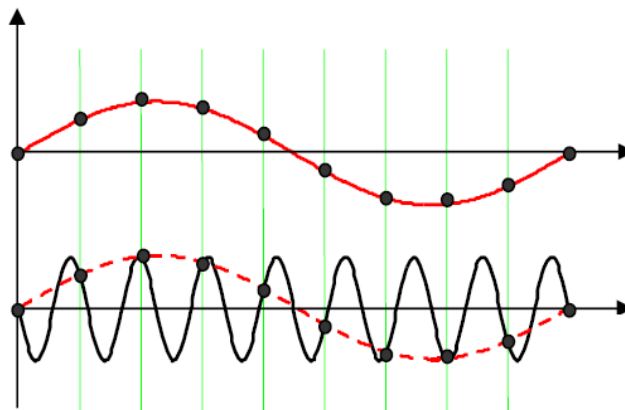
Základem frekvenční analýzy jsou diskrétní Fourierova transformace (DFT – Discrete Fourier Transform) a rychlá Fourierova transformace (FFT – Fast Fourier Transform). Fourierova transformace patří mezi integrální transformace a její základní myšlenkou je, že každou spojitou funkci je možné zapsat jako součet nekonečné řady. Vzniklá Fourierova řada je ve vibrační diagnostice označována jako frekvenční spektrum. Fourierova transformace tedy převádí informace o vibracích z časové oblasti do oblasti frekvenční, kde je každý fyzikální jev zastoupen samostatnou sinusovkou příslušné frekvence (tzv. frekvenční nebo spektrální čarou). Fourierova transformace spojitého signálu $x(t)$ je definována vztahem (8). [2, 9, 14]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

Kde j je imaginární jednotka. Vzorec bývá uváděn také s úhlovou frekvencí $\omega = 2\pi f$.

Většina v současnosti používaných analyzátorů využívá rychlé Fourierovy transformace, což je způsob výpočtu diskrétní Fourierovy transformace, kterým je mnohem rychleji dosaženo stejných výsledků. Aby nebylo dosaženo chybných výsledků, je nutné dát pozor na dvě základní chyby, kterými jsou chyba typu aliasing a chyba únikem. [2, 16]

Důležitým parametrem digitalizování signálu je volba vzorkovací frekvence. Pokud je frekvence odebrání vzorků nedostatečně velká v porovnání s maximální frekvencí signálu, dochází k chybě vzorkování neboli chybě typu aliasing a není reálně zachycen rychlý děj. Princip této chyby je zobrazen na obr. 14), kdy je výsledný signál oproti původnímu zkreslený. Nejvyšší frekvence obsažená ve spektru má hodnotu poloviny vzorkovací frekvence. Část signálu frekvenčních složek vyšších, než polovina vzorkovací frekvence se však zrcadlově objevuje mezi nízkofrekvenčními složkami a tvoří s nimi neodlišitelnou směs (stroboskopický efekt). Řešením této chyby je využití antialiasingového filtru, který ze spektra odstraní složky s vysokou frekvencí. Vzorkovací frekvence by měla být minimálně dvakrát větší než maximální frekvence signálu. [2, 9, 13]



Obr. 14) Princip chyby typu aliasing. [2]

Pro využití Fourierovy transformace je předpokládáno, že vibrační signál je periodickou funkcí. Pokud není tento předpoklad splněn, tedy není v analyzovaném časovém úseku ucelený počet period signálu, dochází k chybě typu leakage³, která může způsobit zkreslení spektra. Pro zmenšení chyby se před výpočtem Fourierovy transformace signál upravuje pomocí vhodných funkcí (tzv. oken). Nejčastěji využívané okno se nazývá Hanningovo. Tato úprava spočívá v odstranění nespojitostí potlačením signálu na jeho koncích k nule, díky čemuž se signál přibližuje reálnému periodickému signálu. [2, 9]

³ chyba únikem

5 ON-LINE MONITOROVACÍ SYSTÉMY

Jedním z nástrojů pro monitorování strojů je on-line vibrační diagnostika, která využívá trvale instalovaných senzorů na částech rotačních strojů. Mezi hlavní výhody on-line diagnostiky patří neustálé měření a kontrola technického stavu stroje bez nutnosti zásahu člověka a vzdálená správa dat. On-line systém dokáže rozpoznat náhlé zhoršení kontrolovaných parametrů okamžitě na rozdíl od pochůzkové formy kontroly (měření ručním analyzátozem), která nemusí zhoršení zaznamenat včas. Další nespornou výhodou je provedení předem zvolených úkonů po přesažení definovaných mezí. Těmito úkony mohou být například spuštění varovné signalizace, odeslání varovného hlášení, nebo přerušení chodu stroje. [17, 18]

V dnešní době existuje velké množství on-line vibrodiagnostických systémů. Jejich pořizovací náklady klesají zásluhou rozvoje výpočetní techniky a v některých případech jsou ceny téměř shodné s cenami pochůzkových analyzátorů. [18]

Každý on-line monitorovací systém by měl splňovat dvě obecná kritéria. Tím prvním je možnost komunikace. Komunikační rozhraní (např. protokol TCP/IP) umožňuje začlenění vyhodnocovací jednotky do sítě, nadřazených systémů a také vzdálenou správu dat. Druhým kritériem je integrace do existujícího systému, tedy začlenění obvykle dodatečně instalované vyhodnocovací jednotky do již existujícího řídicího systému stroje a umožnění oboustranné komunikace. [18]

V následujících podkapitolách je popsáno několik zástupců on-line monitorovacích systémů od firem Adash, ifm electronic, SKF, a také monitorovací systém od firmy 4dot Mechatronic Systems (dále jen 4dot), který měl být použit v praktické části této diplomové práce. Tato kapitola dále obsahuje v samostatných podkapitolách popis diagnostického systému 4dot a porovnání vybraných monitorovacích systémů.

5.1 On-line monitorovací systémy ADASH

5.1.1 A3900-II

Modul A3900-II, který je možné vidět na obr. 15), je jednoduchý a zároveň výkonný prostředek, který slouží k on-line měření vibrací strojů. Jeho uplatnění je především při on-line monitorování stavu točivých strojů, kterými jsou například motory, ventilátory, čerpadla, převodovky a malé turbíny. [19]



Obr. 15) Modul A3900-II. [19]

Tento jednokanálový on-line systém má na čelním panelu třímístný sedmi segmentový displej, na kterém se průběžně zobrazuje hodnota naměřené veličiny. Na čelním panelu se nachází také LED indikátory, které signalizují stav jednotky. Jednotka obsahuje dva výstupy, a to proudovou smyčku 4-20 mA pro výstup měřené hodnoty a přepínací kontakt relé, který signalizuje překročení nastavené limitní hodnoty ALARM. [19]

Limitní hodnoty ALERT a ALARM, měřící rozsah proudové smyčky a další parametry je možné nastavit v programu Hyper Terminal. Porucha či odpojení snímače vibrací nebo jeho kabelu je signalizována na displeji. [19]

Jednotka Adash 3900-II nabízí snadné připojení na systémy řízení a regulace, jednoduchou montáž na DIN lištu a také pomocí připojení modulu A3600 MEMORY ukládání dat na paměťovou kartu. [19]

5.1.2 A3800

Kompaktní on-line monitorovací a diagnostický systém A3800 nabízí volitelný počet samostatných AC a DC vstupních kanálů, jejichž počet může být 4, 8, 12 nebo 16. Například čtyř kanálová konfigurace umožňuje připojit 4 AC a 4 DC kanály. Dále je možné podle počtu aktivních vstupních kanálů použít jeden až čtyři nezávislé TACHO vstupy. Rozšíření aktivního počtu kanálů je možné kdykoliv dokoupením doplňující licence. [20]

Každá čtveřice kanálů jednotky A3800 umožňuje simultánní měření. Jednotlivé čtveřice jsou mezi sebou přepínány pomocí multiplexu. Jednotku je možné jednoduše namontovat na DIN lištu. Veškerá správa a nastavení tohoto systému probíhá v softwaru DDS. U jednotky typu A3800 byl vyvinut adaptivní inteligentní systém sběru dat, takže oproti starším systémům je měření spojitě, nepřerušované a je ukládáno do databáze. Data jsou pro správu a analýzu dostupná z různých pracovišť. [20]



Obr. 16) On-line monitorovací systém A3800. [21]

5.1.3 A3716

Výkonný on-line monitorovací a diagnostický systém A3716 je určen pro zvyšování spolehlivosti provozu strojů. Tento systém je možné používat několika způsoby – jako samostatný monitorovací systém, nadstavbu nad stávající ochranný systém nebo výkonný vícekanálový analyzátor. [22]

Jednotka A3716 je dostupná ve dvou provedeních, které jsou označeny A3716-2U (obr. 17a) a A3716-3U (obr. 17b), jednotlivé moduly je možné snadno stavebnicově skládat a vytvářet mnohokanálové systémy. Každý modul obsahuje 16 AC vstupů, které slouží pro měření vibrací, 16 DC vstupů, které je možné využít pro monitorování procesních veličin jako teploty, tlaku nebo průtoku a 4 TACHO vstupy. Všechny kanály jsou měřeny simultánně. Modul A3716-3U navíc obsahuje 16 BNC výstupů pro měření vstupních signálů, 16 reléových

výstupů a 16 výstupních proudových smyček 4-20 mA. Proudové smyčky jsou izolovány od měřicích obvodů a musí být externě napájeny. 16 kanálů je rozděleno do 4 skupin (A, B, C, D), každá skupina obsahuje 4 kanály a je měřena jednou čtyřkanálovou měřicí deskou. [22, 23]



Obr. 17) On-line monitorovací systém A3716: a) A3716-2U, b) A3716-3U. [23]

5.2 On-line monitorovací systémy ifm electronic

5.2.1 VSE002 a VSE100

Vyhodnocovací jednotky VSE002 a VSE100 jsou určeny pro spolehlivé hlídání vibrací na strojních zařízeních. Tyto jednotky obsahují čtyři dynamické vstupy pro současnou detekci až čtyř vibračních senzorů, dva analogové vstupy a dva spínací výstupy pro předběžný a hlavní poplach. Na obr. 18) je vlevo zobrazena jednotka VSE100 a vpravo VSE002. Jednotky je možné jednoduše namontovat na DIN lištu. [25]

Čtyři dynamické vstupy umožňují připojení a nepřetržité sledování pomocí vibračních nebo procesních senzorů (rychlosti, teploty). Analogové vstupy slouží pro připojení dalších procesních senzorů. Vnitřní paměť umožňuje uchování až 600 000 hodnot pro srovnání dat a hlídání trendů. [25]

Vyhodnocovací jednotka VSE100 navíc obsahuje osm konfigurovatelných digitálních vstupů a výstupů, které slouží pro přepínání variant měření nebo k signalizaci vybraných alarmů. [17, 25]



Obr. 18) Vyhodnocovací jednotky VSE100 (vlevo) a VSE002 (vpravo). [26]

5.2.2 VSE150, VSE151, VSE152, VSE153

Vyhodnocovací jednotky řady VSE15x obsahují čtyři dynamické vstupy, dva analogové vstupy, dva rychlé digitální spínací výstupy pro časově kritické alarmy a různá sběrnice rozhraní pro výměnu dat s příslušným modulem, například PLC. Pomocí přímého připojení PLC přes průmyslovou sběrnici je možná výměna pomocných parametrů, například rychlosti otáčení

nebo spouštěče pro provozní stavy. Jednotky je možné jednoduše namontovat na DIN lištu. [27, 28]

Jednotlivé jednotky řady VSE15x se od sebe odlišují druhem protokolu rozhraní. Jednotka VSE150 (obr. 19) má protokol PROFINET IO, VSE151 má EtherNet/IP, VSE152 má EtherCAT, VSE 153 má Modbus TCP. [29]



Obr. 19) Vyhodnocovací jednotka VSE150. [27]

5.3 On-line monitorovací systémy SKF

5.3.1 SKF Multilog IMx-C

On-line systém SKF Multilog IMx-C je odolná měřicí jednotka určená pro náročné průmyslové prostředí. Měřicí jednotka tohoto typu je vybavena šestnácti vstupy analogového signálu, které je možné konfigurovat pro různé senzory. Analogové vstupy mají samostatné 24 V napájení a výkon senzoru pro každý kanál je řízený přepínači DIP. Kromě analogových vstupů jednotka obsahuje také osm digitálních. Digitální kanály slouží k měření rychlosti nebo zobrazení stavu, jenž ukazuje aktuální měření. Ke každému kanálu je možné připojit několik měřících bodů. Pro každý měřící bod lze individuálně nastavit poplachové a alarmové podmínky, které mohou být řízeny rychlostí nebo zatížením stroje. Na jednom kanále může probíhat AC (střídavé) i DC (stejnoseměrné) měření. Jednotka obsahuje také 4 reléové výstupy. V případě přerušení komunikačního spojení jsou data ukládána do vyrovnávací paměti energeticky nezávislé paměti. [30]

V jednotce je zabudovaný hardware s automatickým diagnostickým systémem. Tento systém neustále kontroluje všechny senzory, kabeláž a elektroniku, jestli nevykazují jakékoli poruchy, přerušení signálu, zkrat nebo výpadek napájení. V případě výpadku napájení se SKF Multilog IMx-C automaticky restartuje, jakmile dojde k obnovení napájení. [30]

5.3.2 On-line systém SKF Multilog IMx-S

On-line systém SKF Multilog IMx-S je odolná měřicí jednotka určená pro náročné průmyslové prostředí. Jedná se o novější řadu výkonných a cenově dostupných systémů, které poskytují včasnou detekci a prevenci poruch. SKF Multilog IMx-S se vyrábí ve dvou provedeních, která jsou označena podle počtu vstupů analogového signálu. SKF Multilog IMx-S 16 má vstupů 16 a SKF Multilog IMx-S 32 má vstupů 32. SKF Multilog IMx-S 16 dále obsahuje 8 digitálních vstupů a 4 reléové výstupy. SKF Multilog IMx-S 32 má digitálních vstupů 16 a reléových výstupů 8. Na obr. 20) je vlevo provedení s označením IMx-S 16 a vpravo IMx-S 32. [31]

Ostatní klíčové vlastnosti jsou shodné s těmi uvedenými u on-line systému SKF Multilog IMx-C.



Obr. 20) SKF Multilog IMx-S 16 (vlevo) a SKF Multilog IMx-S 32 (vpravo). [31]

5.3.3 On-line systém SKF Multilog IMx-W

On-line systém SKF Multilog IMx-W patří do nové řady výkonných a cenově dostupných odolných měřicích jednotek pro diagnostiku větrných turbín. Jednotku je možné využívat jak na pevnině, tak i na moři. [32]

Systém SKF Multilog IMx-W je vybaven šestnácti vstupy analogového signálu, které je možné konfigurovat pro různé typy senzorů. Kromě kanálů analogového signálu obsahuje také dva kanály digitální a dva reléové výstupy. Ke každému kanálu je možné připojit několik měřicích bodů a měřit střídavý (AC) i stejnosměrný (DC) proud. Oproti ostatním uvedeným on-line systémům má tento navíc ochranu před bleskem. [32]

5.3.4 On-line systém SKF Multilog IMx-8

On-line systém SKF Multilog IMx-8 je kompletní systém, který umožňuje včasné zjištění poruch. Toto kompaktní zařízení o rozměrech knížky, které obsahuje osm analogových kanálů a dva digitální je možné připojit k mobilním zařízením a přenosným počítačům pro jednoduchou konfiguraci a monitorování. Pro indikaci stavu systému, varování a alarmu slouží tři reléové výstupy. Pomocí připojení ke cloudu SKF lze ukládat a sdílet data, která slouží pro získávání odborných zpráv a doporučení. IMx-8 má interní paměť o velikosti 4 GB, která slouží pro uložení hodnotných dat v případě přerušení komunikace, také je ho možné provozovat v autonomním režimu, kdy není zapotřebí využívat připojení k centrálnímu softwarovému systému nebo externí datové komunikace, protože jsou data pouze měřena a ukládána pro pozdější analýzu. Data stroje je možné v reálném čase zobrazit na mobilním zařízení operátora. [33]

Analyzátor IMx-8 (obr. 21) je určen pro namontování na DIN lištu, pro větší ochranu v náročných průmyslových prostředích je možné jej umístit do skříňky s krytím IP65 (obr. 22). [33]



Obr. 21) On-line systém SKF Multilog IMx-8. [33]



Obr. 22) Skříňka s krytím IP65. [33]

5.4 On-line monitorovací systém 4dot

5.4.1 Chipmunk 1.0

Chipmunk (obr. 23) je monitorovací jednotka kompaktních rozměrů určená k montáži na DIN lištu v rozvaděči s krytím minimálně IP65. Tato jednotka je součástí diagnostického systému 4dot pro sledování strojů ve výrobě on-line, obsahuje 4 simultánně vzorkované kanály pro senzory vibrací. Chipmunk umožňuje sledování nízkotáčkových komponent a identifikaci více poruchových stavů díky širokému frekvenčnímu pásmu vstupů. Při výpadku internetového připojení nedojde ke ztrátě dat díky energeticky nezávislé paměti o kapacitě 12 GB, záloha dat je možná také na flash disk. Stav zařízení je indikován třemi LED diodami na přední straně jednotky.



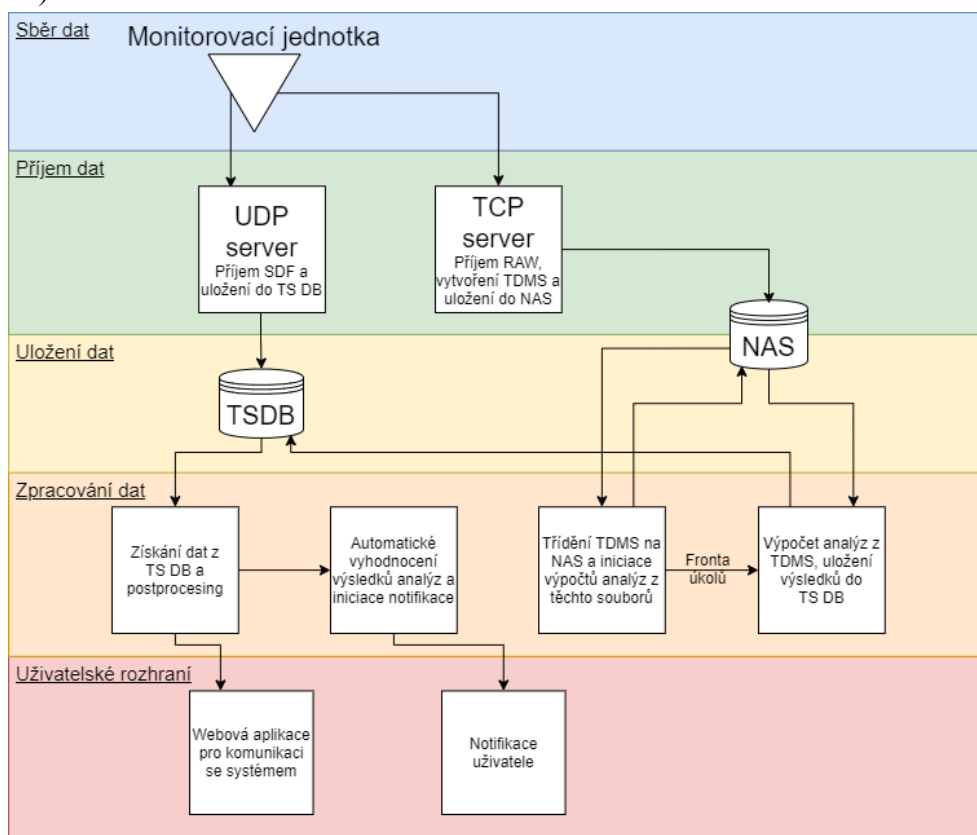
Obr. 23) Monitorovací jednotka Chipmunk.

Diagnostický systém 4dot zahrnuje veškeré algoritmy pro pečlivé sledování strojů, hlídání nabourání, sledování vytížení, analýzy příčiny poruchy, a také kontrolu nastavení a limitů.

Chipmunk data získaná pomocí senzorů umístěných na stroji zpracuje, zašifruje a odešle na vzdálený server, kde jsou vyhodnocena pomocí algoritmů. Po zpracování a vyhodnocení jsou data zobrazena v on-line aplikaci 4dot, která umožňuje upozornění pomocí e-mailu nebo SMS na zvýšené hodnoty pomocí nastavených limitů. Podrobněji je diagnostický systém 4dot popsán v následující podkapitole.

5.5 Diagnostický systém 4dot

Diagnostický systém 4dot je složen z několika různých aplikací, úložišť a zařízení, která mezi sebou vzájemně komunikují a zajišťují měření, odesílání, zpracování a vyhodnocení dat. Při překročení nastavených limitů pro konkrétní zařízení během vyhodnocování dat systém zařídí upozornění na toto zhoršení. Blokové schéma diagnostického systému 4dot je zobrazeno na obrázku 24).



Obr. 24) Blokové schéma diagnostického systému 4dot.

Systém je možné rozdělit do několika kategorií. První kategorií je sběr dat, který zahrnuje měření dat a jejich odeslání monitorovací jednotkou na server. Data z monitorovací jednotky jsou odesílána dvěma různými způsoby, které záleží na typu odesílaných dat. Prvním způsobem je odesílání předzpracovaných dat, která jsou snímána kontinuálně během chodu monitorovací jednotky. Druhým způsobem je odesílání surových dat (nezpracovaná data naměřená monitorovací jednotkou ze snímačů), která jsou snímána v pravidelných intervalech. Na kategorii sběru dat navazuje příjem dat, který zahrnuje příjem dat z monitorovací jednotky, převod dat do standardního formátu a podle typu dat uložení do NAS⁴ nebo TSDB⁵. Uložení dat je tedy další kategorií diagnostického systému 4dot, na který navazuje zpracování dat. Do

⁴ Network Attached Storage – datové úložiště připojené k místní síti

⁵ Time series database – databáze časových řad

kategorie zpracování dat patří aplikace zajišťující výpočet analýz naměřených dat, aplikování postprocesů na výsledky analýz a automatické vyhodnocení výsledků analýz. Poslední kategorií je uživatelské rozhraní, které zajišťuje veškerou komunikaci s uživateli systému. Součástí uživatelského rozhraní je webová aplikace pro zobrazení výstupů analýz, interní aplikace pro nastavení a ovládání systému, a také funkce notifikace uživatele.

5.6 Porovnání vybraných monitorovacích systémů

Pro porovnání byl vybrán jeden zástupce monitorovacích systémů od každé firmy uvedených v této kapitole. Konkrétně to jsou A3800 od firmy Adash, VSE151 od firmy ifm electronic, Multilog IMx-8 od firmy SKF a Chipmunk od firmy 4dot.

V tab 1) jsou uvedeny technické specifikace jednotlivých monitorovacích systémů.

Tab 1) Technická specifikace monitorovacích systémů. [21, 28, 34]

	A3800	VSE151	SKF Multilog IMx-8	Chipmunk
Vstupy	4-16 AC 4-16 DC 1-4 nezávislé TACHO vstupy pro externí trigger rozsah otáček 0,8 Hz – 1000 Hz	6 vstupů (2 analogové)	8 analogových 2 digitální	4 analogové
Výstupy	4-16 DC	2 (digitální a konfigurovatelné)	3 reléové výstupy	-
Frekvenční rozsah	Max. 25,6 kHz	Max. 12 kHz	DC až 40 kHz	DC až 50 kHz
Vzorkovací frekvence	65,5 kHz	100 kHz	Max. 102,4 kHz	128 kHz
AD převodník	24 bit	16 bit	24 bit	24 bit
Počet spektrálních čar	Min. 100 čar Max. 25 600 čar	-	100 až 6400 čar	-
Zpracování dat	Širokopásmové hodnoty Časové signály FFT v reálném čase DEMOD – ENVELOPE analýza	Diagnostika valivých ložisek Monitorování limitních hodnot Monitorování středních (RMS) hodnot Monitorování špičkových hodnot	Obálka zrychlení FFT Časový průběh Integrace a derivace ve frekvenční oblasti Detekce nárazu Diagnostika strojů	-

	ACMT – analýza pomaloběžných ložisek Řadová analýza Uživatelská definice pásem Měření otáček Měření DC signálů Orbity	FFT Spektrální obálka	s proměnlivými a nízkými otáčkami Orbity	
Komunikace	Ethernet	Ethernet/IP	Modbus RTU, Modbus TCP/IP IEC 61850	Ethernet

Jednotlivé monitorovací systémy se liší především počtem senzorů, které je možné k těmto systémům připojit, frekvenčním rozsahem, vzorkovací frekvencí a možnostmi zpracování dat.

Nevýhodou monitorovací jednotky Chipmunk oproti ostatním monitorovacím systémům je možnost použití pouze 4 senzorů vibrací nebo vzdálenosti a absence výstupů.

Výhodou je vyšší frekvenční rozsah a vzorkovací frekvence než u konkurenčních výrobků.

Cloudové řešení umožňuje ukládat a zpracovávat výpočetně i datově náročné analýzy a naměřená data zálohovat pro možnost zpětného využití. Tuto skutečnost je možné považovat za výhodu i nevýhodu zároveň. Vyhodnocování dat neprovádí jednotka, ale algoritmy probíhající na vzdáleném serveru, takže vyhodnocení není omezeno výpočetním výkonem jednotky, zároveň ale není možné lokální zobrazení dat pomocí této jednotky, ale pouze vzdálené pomocí aplikace.

6 OBRÁBĚNÍ

V této kapitole jsou popsány teoretické základy frézování, které souvisí s praktickou částí této práce, a také kmitání soustavy obrábění.

6.1 Frézování

Frézování patří mezi základní metody obrábění pomocí nástrojů s definovanou geometrií. Při frézování je odebrán materiál obrobku pomocí břitů rotujícího nástroje. Posuv je nejčastěji konán obrobkem ve směru kolmém k ose nástroje. Moderní frézovací centra umožňují posuvové pohyby provádět ve všech směrech a plynule je měnit. Při frézování každý zub frézy odřezává krátké třísky proměnné tloušťky, řezný proces je tedy přerušovaný. Podle použitého nástroje se frézování rozlišuje na válcové, čelní a dále odvozené okružní a planetové. [35]

Při využití válcových a tvarových fréz, které mají vytvořeny zuby pouze po obvodu, se frézování označuje jako válcové. Hloubka odebírané vrstvy se nastavuje kolmo na osu frézy a na směr posuvu. Osa otáčení frézy je rovnoběžná s obrobenou plochou. Podle smyslu rotace nástroje a směru posuvu obrobku se rozlišuje frézování sousledné (sousměrné) a nesousledné (protisměrné). [35]

Při využití čelních fréz se frézování označuje jako čelní. Čelní frézy mají vytvořeny břity na obvodu i čele nástroje. Pokud osa nástroje prochází středem frézované plochy, je frézování nazýváno symetrické. Při nesymetrickém frézování je osa nástroje mimo střed frézované plochy. Během čelního frézování fréza pracuje zároveň sousledně i nesousledně. [35]

6.1.1 Základní vzorce řezných podmínek

Hodnota řezné rychlosti se vypočítá podle vztahu (9). Základní jednotkou posuvového pohybu je posuv na zub f_z [mm]. Tato hodnota udává délku dráhy, kterou ujede obrobek po dobu záběru zubu. Vztah (10) udává výpočet posuvu na otáčku f_n , což je délka dráhy, kterou ujede obrobek po dobu jedné otáčky nástroje. Pomocí vztahu (11) lze vypočítat posuvovou rychlost. [35]

$$v_c = \pi \times D \times n \times 10^{-3} \text{ [m} \times \text{min}^{-1}] \quad (9)$$

$$f_n = f_z \times z \text{ [mm]} \quad (10)$$

$$v_f = f_n \times n = f_z \times z \times n \text{ [mm} \times \text{min}^{-1}] \quad (11)$$

Kde:

D ...průměr nástroje [mm]

n ...otáčky nástroje [min^{-1}]

z ...počet zubů (břitů) nástroje [–]

6.2 Kmitání při obrábění

Obráběcí stroj spolu s nástrojem a obrobkem dohromady tvoří obráběcí systém se složitými dynamickými charakteristikami. V průběhu řezného procesu vzniká kmitání jednotlivých prvků obráběcího systému, které zhoršuje kvalitu obrobené plochy, zvyšuje intenzitu opotřebení

nástroje, urychluje opotřebení jednotlivých součástí obráběcího stroje a také zhoršuje pracovní prostředí. Kmitání se podle druhu vnějšího působení dělí na vlastní, vynucené a samobuzené. [35]

6.2.1 Vlastní kmitání

Vlastní kmity jednotlivých částí soustavy jsou určeny vlastními frekvencemi. Toto kmitání je vyvoláno určitým rázem (např. zapnutím spojky nebo záběrem nástroje). Působení pružných sil udržuje vlastní kmity, ale různé odpory způsobují utlumení kmitání, proto se většinou vliv vlastních kmitů na proces obrábění zanedbává. [35, 36]

6.2.2 Vynucené kmitání

Vynucené kmitání vzniká vlivem působení budících sil, které jsou periodicky časově proměnlivé. Frekvence kmitání je obvykle shodná s frekvencí budící síly. Vynucené kmitání nejčastěji vzniká při frézování (s válcovými a čelními frézami), vynucené kmity mají frekvenci přímo úměrnou otáčkám frézy. [35, 36]

Vynucené kmitání je možné rozdělit na tři druhy, a to kmitání přenášené z okolí, kmitání vyvolané vlastním řezným procesem a kmitání nevyvolané řezným procesem. Kmitání vyvolané vlastním řezným procesem může být způsobené například přerušovaným řezem, nebo kolísáním hloubky řezu. Kmitání nevyvolané řezným procesem vzniká v důsledku nevyváženosti rotujících součástí, setrvačných sil vznikajících vratným rotačním nebo přímočarým pohybem součástí, nepřesností převodových mechanismů obráběcího stroje, nebo rotací nesymetrických hřídelů. [35]

6.2.3 Samobuzené kmitání

Ke vzniku samobuzeného kmitání dochází bez periodického vnějšího budícího účinku. První impuls vyvolá výchylku z rovnovážné polohy a uvede soustavu do samobuzeného kmitání, které dále probíhá bez přívodu energie z vnějšku. Frekvence samobuzeného kmitání je závislá pouze na vlastnostech kmitající soustavy a je velmi blízká vlastní frekvenci některého řídicího členu systému. Prvním impulzem samobuzeného kmitání může být například uvolnění nárustku z nástroje, nebo náraz nástroje na tvrdší částici ve struktuře obráběného materiálu. [35, 36]

Podle příčiny vzniku je možné samobuzené kmitání dělit na kmitání vyvolané činitelem nesouvisejícího s procesem řezání a kmitání vyvolané činitelem přímo souvisejícího s procesem řezání. [35, 36]

Do kategorie, která nesouvisí s procesem řezání patří dvě typické formy kmitání, především relaxační kmitání, které se vyskytuje při obrábění velmi pomalými posuvovými rychlostmi. Druhá forma je kmitání, které vzniká při používání kopírovacích systémů se zpětnou vazbou. [35, 36]

Nejčastěji se při obrábění vyskytuje samobuzené kmitání, kdy budící síla souvisí s řezným procesem. Tento druh samobuzeného kmitání se projevuje hlukem a výraznou vlnitostí obrobené plochy. Kmity se nazývají skoro harmonické samobuzené kmity a jsou vyvolány samotnou řeznou silou. Frekvence těchto kmitů jsou určeny tuhostí a hmotou částí obráběcího systému, často jsou blízké frekvenci vlastních kmitů soustavy nebo některého členu soustavy. Během samobuzeného kmitání existuje tzv. zpětná vazba mezi řeznou silou vyvolávající kmitavý pohyb a její periodická změna je podmíněna existencí samobuzených kmitů. [35, 36]

7 POPIS MĚŘENÍ

Z důvodu složité celosvětové situace, která nastala v době měření, nebylo možné provést měření podle původního plánu monitorovací jednotkou Chipmunk od firmy 4dot, i když bylo pro měření všechno připravené. Naměřená data a obrázky spojené s měřením jsou převzaty od vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Zutha, Ph.D. Převzatá nezpracovaná data byla naimportována do systému 4dot a vyhodnocení bylo provedeno pomocí softwaru firmy 4dot. Pro ukázkou funkčnosti monitorovací jednotky Chipmunk je v příloze 1 zobrazeno příkladové měření pomocí této monitorovací jednotky včetně popisu provedeného měření.

7.1 Použitý obráběcí stroj

Měření bylo provedeno na vertikálním obráběcím centru MCV 754 Quick (obr. 25) od výrobce Kovosvit MAS, které je umístěno v laboratoři fakulty strojního inženýrství s označením C1. Toto zařízení není nasazeno do trvalého výrobního procesu, ale je využíváno při výuce nebo pro výrobu prototypů. Obecně je toto tříosé vertikální frézovací centrum určené pro náročné práce v kusové i sériové výrobě, běžně je pomocí něho prováděno obrábění dílců z oceli, litin, neželezných kovů a plastických hmot, které jsou upnuty na pracovním stole. Při obrábění nestandardních materiálů je nutné aplikovat jiný způsob odstraňování třísek z pracovního prostoru. Pomocí tohoto obráběcího centra je možné provádět několik operací, například vrtání, vystružování, vyvrtávání, frézování a řezání závitů. [37]

Lože tvoří základ stroje. Stůl slouží k upnutí obráběného dílce a pohybuje se po saních (osa X), které přejíždějí po loži (osa Y). Na lože je připevněn stojan, po kterém se pohybuje vřeteník (osa Z). Pohony posuvů všech tří os jsou zajištěny regulačními motory připojenými na kuličkové šrouby. Vřeteno, jehož pohon je proveden regulačním motorem je vybaveno strmým upínacím kuželem 7:24 velikosti 40 a středovým upínáním nástrojů. Obráběcí centrum je vybaveno rotačním zásobníkem nástrojů s mechanickou rukou pro 24 nástrojů, které je stejně jako uvolňování nástrojů ve vřetenu pneumatické. Zabránění rozstříku chladicí kapaliny od středového nebo vnějšího chlazení nástrojů je zajištěno kryty pracovního prostoru se zasouvacími dveřmi. V tabulce 2) jsou uvedeny základní technické parametry obráběcího centra MCV 754 Quick. [37]



Obr. 25) MCV 754 Quick. [38]

Tab 2) Základní technické parametry obráběcího centra MCV 754 Quick. [37]

HLAVNÍ ROZMĚRY	
Délka×šířka×výška	2320×2590×2560 mm
Hmotnost stroje	4000 kg
Rozměry upínací plochy stolu	1000×500 mm
Největší délka dráhy stolu (X)	754 mm
Největší délka dráhy saní (Y)	500 mm
Největší délka dráhy vřetena (Z)	550 mm
Maximální zatížení stolu	400 kg
POLOHOVÁNÍ	
Rychloposuv	30000 mm×min ⁻¹
Posuv pracovní	1-15000 mm×min ⁻¹
VŘETENO	
Otáčky	20-10000 min ⁻¹
Změna otáček	Plynule měnitelné
Upínací síla nástroje	10000 N
ZÁSOBNÍK NÁSTROJŮ	
Počet poloh	24
Maximální průměr nástroje (všechny polohy obsazeny)	75 mm
Maximální průměr nástroje (vynechání sousední polohy)	120 mm
Maximální délka nástroje	250 mm
Maximální hmotnost nástrojů v zásobníku	65 kg

7.2 Měřicí aparatura

Měření bylo provedeno pomocí tří jednoosých akcelerometrů, které byly připojeny k monitorovacímu systému SKF Multilog IMx-8. Zároveň bylo měřeno tříosým akcelerometrem napojeným na měřicí kartu NI 9234.

7.2.1 CTC AC244-1D

Piezoelektrický akcelerometr s označením AC244-1D (obr. 26) od společnosti CTC je smykovýho typu a snímá vibrace v jedné ose. Tento akcelerometr má svařovanou konstrukci z nerezové oceli pro zvýšení odolnosti, která je v náročných průmyslových prostředích zapotřebí. Každý senzor je testovaný a kalibrovaný, je doporučena kalibrace minimálně jednou za rok. Základní technické parametry tohoto akcelerometru jsou uvedeny v tabulce 3). [39]



Obr. 26) Piezoelektrický akcelerometr AC244-1D od firmy CTC. [40]

Tab 3) Základní technické parametry akcelerometru AC244-1D. [40]

Citlivost (± 5 %)	100	mV/g
Frekvenční rozsah (± 10 %)	1,0 až 10000	Hz
Dynamický rozsah	± 50	g
Rezonanční frekvence	26000	Hz
Teplotní rozsah	-50 až 121	°C
Hmotnost	60	gramů

7.2.2 PCB 356B18

Piezoelektrický akcelerometr smykového typu s označením 356B18 (obr. 27) od společnosti PCB Piezotronics snímá vibrace ve třech osách. Výrobce doporučuje provádět pravidelnou kalibraci každý rok, případně po vystavení jakýmkoliv teplotním extrémům, nárazům, nepřiměřeným zatížením, nebo před kritickým testem. Základní technické parametry tohoto akcelerometru jsou uvedeny v tabulce 4). [41]

Tab 4) Základní technické parametry akcelerometru 356B18. [41]

Citlivost (± 10 %)	1000	mV/g
Frekvenční rozsah (± 10 %)	0,3 až 5000	Hz
Dynamický rozsah	± 5	g
Rezonanční frekvence	≥ 20000	Hz
Teplotní rozsah	-29 až 77	°C
Hmotnost	25	gramů



Obr. 27) Piezoelektrický akcelerometr 356B18 od firmy PCB Piezotronics. [41]

7.2.3 NI 9234

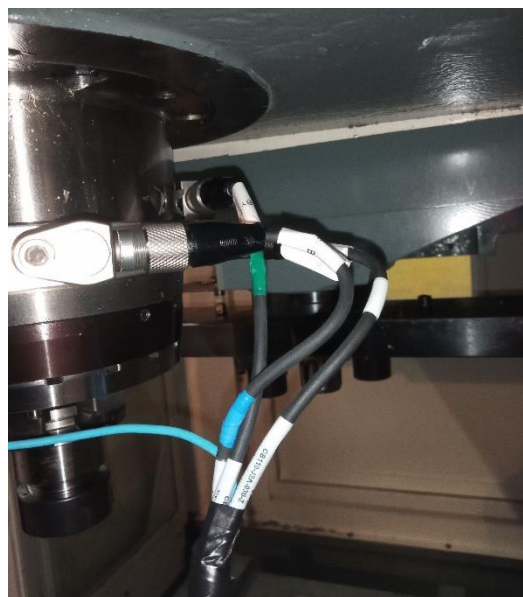
NI 9234 (obr. 28) je sběrný modul pro měření s vysokou přesností, který obsahuje čtyři kanály. Analogová měřicí karta NI 9234 od firmy National Instruments je vhodná pro velké množství mobilních nebo přenosných aplikací jako je například monitorování stavu průmyslových strojů. Každý kanál obsahuje antialiasingový filtr, který se automaticky přizpůsobuje použité vzorkovací frekvenci, jejíž hodnota je až 51,2 kHz. [42]



Obr. 28) Analogová měřicí karta NI 9234. [42]

7.3 Umístění akcelerometrů

Všechny čtyři senzory vibrací jsou připevněny k hliníkové objímce šroubovým spojením, které zaručuje malé ovlivnění frekvenčního rozsahu snímačů a zároveň spolehlivé uchycení. Objímka je připevněna na vřeteno. Na obrázku 29) vlevo je zobrazeno přichycení akcelerometrů k hliníkové objímce a vpravo připevněná objímka na vřetenu a akcelerometry s kabeláží. Jak je možné vidět na obrázku 29) vlevo, jednoosé akcelerometry jsou přichyceny v místě zkosení, jehož úhel je 45°. Hodnota natočení byla zadána před měřením do měřicího softwaru, aby výsledek měření odpovídal požadovaným osám měření.



Obr. 29) Přichycené akcelerometry k hliníkové objímce (vlevo) a připevněná objímka na vřetenu včetně akcelerometrů a kabeláže (vpravo). Převzato od vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Zutha, Ph.D.

7.4 Postup měření

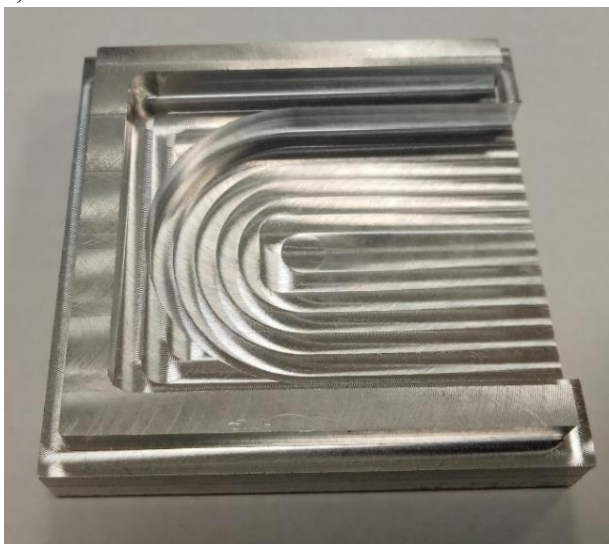
V této podkapitole je popsán postup měření zrychlení vibrací vřetene obráběcího centra při obrábění testovacích vzorků. Výrobní výkres testovacího vzorku z hliníkové slitiny EN AW 6060 (AlMgSi) je zobrazen v příloze 2. Obrábění totožného obrobku bylo provedeno dvakrát, přičemž jednou byly řezné podmínky ideální a podruhé neideální. Řezné podmínky obou obrábění jsou uvedeny v tabulce 5).

Testovací vzorek (obr. 30) byl zhotoven z polotovaru o rozměrech 60×60×15 mm pomocí několika operací, nejdříve bylo provedeno čelní frézování, na které navazovalo frézování hran, frézování obdélníkové kapsy a na závěr frézování kruhové kapsy. Frézování obdélníkové i kruhové kapsy bylo provedeno ve dvou vrstvách.

Tab 5) Řezné podmínky obrábění.

	Obrobek 1 (ideální podmínky)		Obrobek 2 (neideální podmínky)	
	Čelní frézování	Ostatní operace	Čelní frézování	Ostatní operace
Posuv na zub	0,1 mm/zub	0,05 mm/zub	0,12 mm/zub	0,075 mm/zub
Posuvová rychlost	637 mm/min	955 mm/min	917 mm/min	1432 mm/min
Řezná rychlost	100 m/min	120 m/min	120 m/min	120 m/min
Otáčky	1592 1/min	6366 1/min	1910 1/min	6366 1/min
Otáčková frekvence	26,5 Hz	106,1 Hz	31,8 Hz	106,1 Hz
Frekvence dotyku zubů	106 Hz	318,3 Hz	127,3 Hz	318,3 Hz

Pro čelní frézování byla použita čtyřbřitá monolitní karbidová fréza průměru 20 mm s břity ve šroubovici se stoupáním 30°, která má označení EC-A4 20-32C20E104 IC08. Pro ostatní operace byla použita trojbřitá monolitní karbidová fréza průměru 6 mm s břity ve šroubovici se stoupáním 45°, která má označení EC060B16-3C06.



Obr. 30) Testovací vzorek. Převzato od vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Zutha, Ph.D.

Úkolem tohoto experimentálního měření bylo ověření schopnosti posouzení kvality obráběcího procesu pomocí naměřených vibrací vřetene obráběcího zařízení, tedy ověření

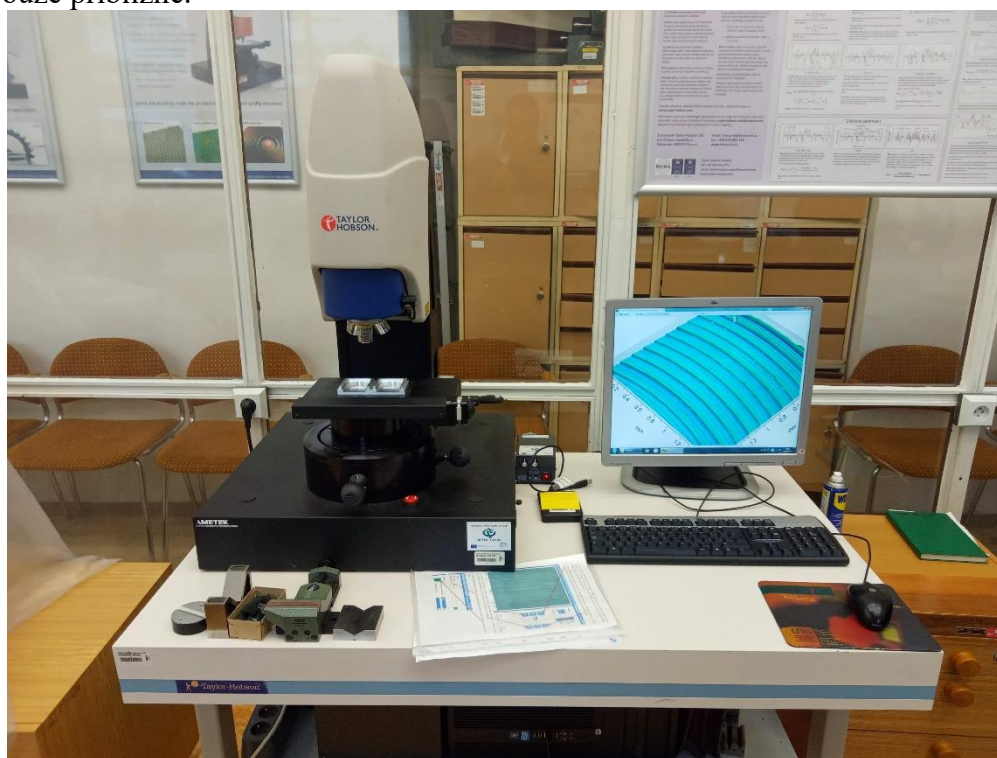
schopnosti rozpoznat rozdíly mezi vibracemi získanými během jednotlivých obrábění. Po dokončení zkušebních obrobků bylo provedeno vyhodnocení kvality povrchu několika míst obrobků pro posouzení vlivu použitých podmínek obrábění na kvalitu povrchu obrobků.

7.5 Popis vyhodnocení kvality povrchu

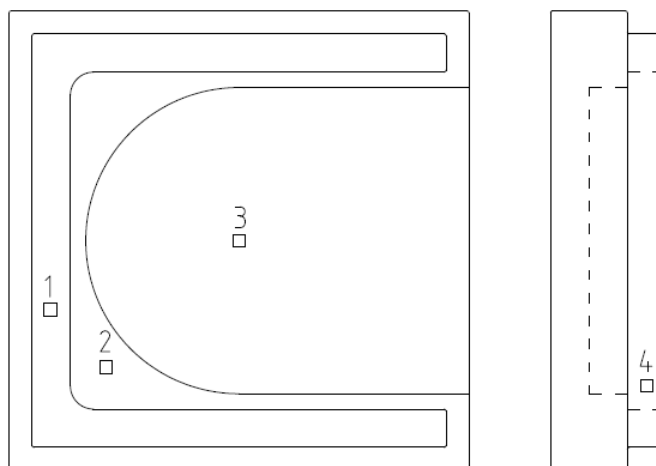
Měření bylo provedeno pomocí přístroje Taylor Hobson Talysurf CCI Lite (obrázek 31), který se nachází v laboratoři přesné a experimentální metrologie ÚVSSR FSI VUT v Brně. Tento bezdotykový 3D profilometr je založen na principu koherenční korelační interferometrie. Přístroj je vybaven snímačem obrazu, který má rozlišení 1024×1024 pixelů, a také třemi objektivy typu Mirau se zvětšením $10\times$, $20\times$ a $50\times$. Vyhodnocované plochy pomocí těchto objektivů jsou velké přibližně $1,65 \times 1,65$ mm, $0,825 \times 0,825$ mm a $0,33 \times 0,33$ mm. [43]

Naměřená data jsou zpracována v softwaru TalyMap Gold, jenž umožňuje vytvořit 2D a 3D model analyzovaného povrchu. Tento program využívá různé způsoby úprav modelu povrchu, kterými jsou například vyrovnaní povrchu, odstranění tvaru, interpolace naměřených bodů atd. Dále je možné pomocí tohoto programu vyhodnocovat různé parametry textury povrchu dle řady norem, či export dat v mnoha formátech pro další zpracování. [43]

Všechna měření byla provedena objektivem, který má zvětšení $10\times$ v předem definovaných místech obou vzorků, které jsou označeny čísly 1 až 4 a orientačně naznačeny na obrázku 32). Místa měření textury povrchu byla zvolena v místech provádění jednotlivých operací obrábění, tedy každé měřené místo odpovídá jiné operaci. U obou obrobků byla snaha provést měření na stejných místech, ale vzhledem k velikosti vyhodnocované plochy jsou tato místa stejná pouze přibližně.



Obr. 31) Taylor Hobson Talysurf CCI Lite. Převzato od vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Zutha, Ph.D.



Obr. 32) Označení míst měření textury povrchu obrobků.

Texturu povrchu je možné definovat jako opakované nebo náhodně uspořádané odchylky od geometrického tvaru, které tvoří třírozměrnou topografii povrchu. Texturu povrchu je možné charakterizovat pomocí jeho stop po obrábění, odchylek tvaru, nedokonalostí (např. prohlubeniny, rýhy, škrábance, trhliny, dutiny atd.), vlnitosti a drsnosti na posuzované ploše povrchu. [44]

Drsnost povrchu je specifická vlastnost, která úzce souvisí s geometrickými vlastnostmi textury povrchu. Vyhodnocovány jsou vybrané profilové parametry drsnosti povrchu, které jsou počítány z profilu drsnosti, což je profil odvozený ze základního profilu. Tyto parametry se označují jako R-parametry (R z anglického roughness). Přehled vybraných vyhodnocovaných parametrů profilu drsnosti dle normy ČSN EN ISO 4287 se nachází níže. [44]

Dále jsou vyhodnocovány vybrané plošné parametry drsnosti povrchu, které jsou získány z odvozeného povrchu od základního povrchu pomocí filtrování. Plošné parametry slouží pro komplexnější analýzu zkoumaného povrchu a jsou definovány normou ČSN EN ISO 25178-2. [44]

7.5.1 Vybrané profilové parametry drsnosti povrchu

Největší výška výstupku profilu R_p

Největší výška výstupku profilu R_p je popsána vztahem (12). Je to výška nejvyššího výstupku profilu Z_p v rozsahu základní délky.

$$R_p = \max(Z_{p_i}) [\mu\text{m}] \quad (12)$$

Největší hloubka prohlubně profilu R_v

Největší hloubka prohlubně profilu R_v je popsána vztahem (13). Je to hloubka maximální (nejnižší) prohlubně profilu Z_v v rozsahu základní délky.

$$R_v = \max(|Z_{v_i}|) [\mu\text{m}] \quad (13)$$

Největší výška profilu R_z

Největší výška profilu R_z je popsána vztahem (14). Je to součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.

$$R_z = R_p + R_v [\mu\text{m}] \quad (14)$$

Průměrná výška prvků profilu R_c

Průměrná výška prvků profilu R_c je popsána vztahem (15). Je to průměrná hodnota výšek prvků profilu Z_t v rozsahu základní délky.

$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} [\mu\text{m}] \quad (15)$$

Celková výška profilu R_t

Celková výška profilu R_t je popsána vztahem (16). Je to součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu vyhodnocované délky.

$$R_t = Z_p + Z_v [\mu\text{m}] \quad (16)$$

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a je popsána vztahem (17). Je to aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ v rozsahu základní délky (l_r).

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx [\mu\text{m}] \quad (17)$$

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu R_q

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu R_q je popsána vztahem (18). Je to směrodatná odchylka (kvadratický průměr) souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^2(x) dx} [\mu\text{m}] \quad (18)$$

Šikmost posuzovaného profilu R_{sk}

Šikmost posuzovaného profilu R_{sk} je popsána vztahem (19). Je to podíl průměrné hodnoty třetích mocnin souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky.

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^3(x) dx \right] [-] \quad (19)$$

Špičatost posuzovaného profilu R_{ku}

Špičatost posuzovaného profilu R_{ku} je popsána vztahem (20). Je to podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty R_q v rozsahu základní délky.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \left[\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} Z^4(x) dx \right] [-] \quad (20)$$

7.5.2 Vybrané plošné parametry drsnosti povrchu

Průměrná kvadratická výška posuzovaného povrchu S_q

Průměrná kvadratická výška posuzovaného povrchu S_q je popsána vztahem (21). Tento parametr je dán střední kvadratickou hodnotou souřadnic uvnitř definiční plochy (A).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{|A|} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad [\mu\text{m}] \quad (21)$$

Šikmost posuzovaného povrchu S_{sk}

Šikmost posuzovaného povrchu S_{sk} je popsána vztahem (22). Je to podíl průměrné hodnoty třetích mocnin hodnot souřadnic a třetí mocniny průměrné kvadratické výšky posuzovaného povrchu S_q uvnitř definiční plochy (A).

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{|A|} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad [-] \quad (22)$$

Špičatost posuzovaného povrchu S_{ku}

Špičatost posuzovaného povrchu S_{ku} je popsána vztahem (23). Je to podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin hodnot souřadnic a čtvrté mocniny průměrné kvadratické výšky posuzovaného povrchu S_q uvnitř definiční plochy (A).

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{|A|} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad [-] \quad (23)$$

Maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu S_p

Maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu S_p je popsána vztahem (24). Je to výška nejvyššího vrcholu na definiční ploše.

$$S_p = \max\{z_p(x, y)\} \quad [\mu\text{m}] \quad (24)$$

Maximální hloubka prohlubně posuzovaného povrchu S_v

Maximální hloubka prohlubně posuzovaného povrchu S_v je popsána vztahem (25). Je to absolutní hodnota hloubky nejnižší položeného bodu definiční oblasti.

$$S_v = \max\{|z_v(x, y)|\} \quad [\mu\text{m}] \quad (25)$$

Maximální výška posuzovaného povrchu S_z

Maximální výška posuzovaného povrchu S_z je popsána vztahem (26). Je to součet výšky nejvyššího vrcholu posuzovaného povrchu S_p a maximální hloubky dna posuzovaného povrchu S_v na definiční ploše.

$$S_z = S_p + S_v \quad [\mu\text{m}] \quad (26)$$

Průměrná aritmetická výška posuzovaného povrchu S_a

Průměrná aritmetická výška posuzovaného povrchu S_a je popsána vztahem (27). Je to aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic uvnitř definiční plochy (A).

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{|A|} \iint_A |z(x, y)| \, dx \, dy} \, [\mu\text{m}] \quad (27)$$

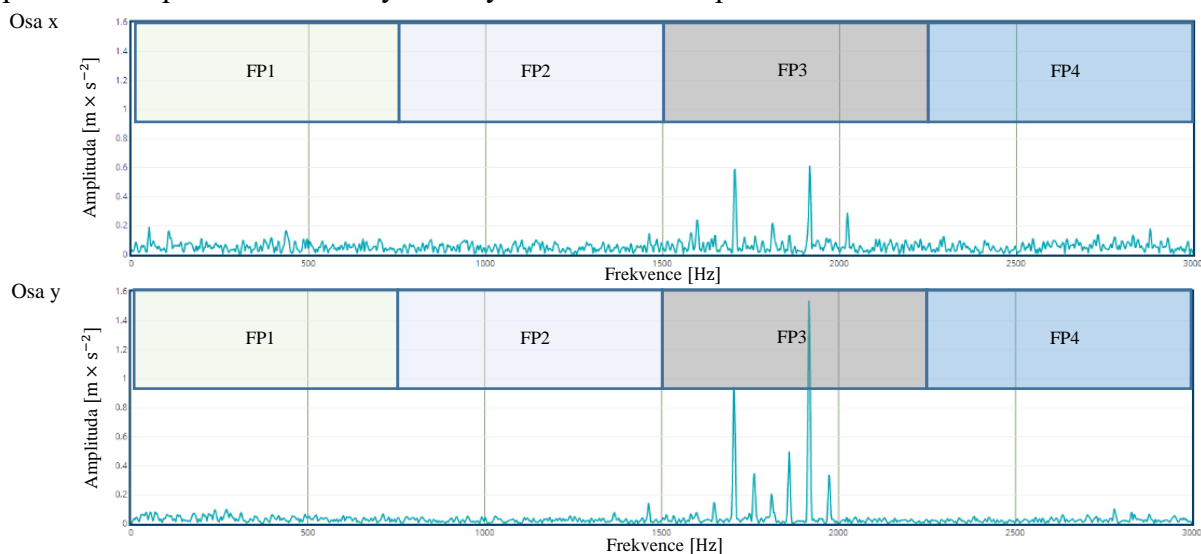
8 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

8.1 Vyhodnocení vibrací

Vyhodnocení naměřených zrychlení vibrací bylo provedeno pomocí interní webové aplikace 4dot, která slouží pro nastavení a ovládání celého systému. Toto prostředí je možné rozdělit na dvě hlavní části, tou první je vývojářské prostředí, kde je možné přidávat, upravovat, nebo odstraňovat společnosti, zařízení, komponenty, analýzy a mnoho dalších položek, které se zapisují do databáze. Druhou částí je prostředí, které slouží k zobrazování vytvořených položek a výstupů analýz, které se počítají na vzdáleném serveru. Podrobněji je toto prostředí včetně ukázky databáze popsáno v příloze 3. V tomto prostředí se provádí také nastavení, které určuje položky zobrazené ve webové aplikaci IDA, která slouží pro zákazníky firmy 4dot. Ukázka webové aplikace IDA se nachází v příloze 4.

Vyhodnocení měření spočívá v porovnání frekvenčních spekter vibrací získaných z měření vibrací při jednotlivých operacích frézování obou obrobků, tedy frézování při ideálních a neideálních řezných podmínkách. Dále jsou porovnány energie těchto frekvenčních spekter vibrací v několika frekvenčních pásmech. Osy měření vibrací jsou označeny stejně jako osy použitého obráběcího stroje. Osa x je ve směru posuvu stolu po saních, osa y ve směru posuvu saní po loži a osa z ve směru posuvu vřeteníku po stojanu. Kvalita zobrazovaných frekvenčních spekter vibrací je dána použitým softwarem.

Protože jsou vibrace při frézování v ose z v porovnání s těmi v osách x a y méně výrazné, mají v případě tohoto experimentálního měření menší význam a vyhodnocení je zaměřeno na vibrace v osách x a y. Energie frekvenčních spekter vibrací jsou vyhodnocovány ve čtyřech frekvenčních pásmech, která jsou označena FP1 (2–750 Hz), FP2 (750–1500 Hz), FP3 (1500–2250 Hz) a FP4 (2250–3000 Hz). Rozmezí těchto frekvenčních pásem je zvoleno tak, aby rovnoměrně pokrylo celý frekvenční rozsah vyhodnocovaných frekvenčních spekter vibrací. Pro možnost porovnání s frekvenčními spektry vibrací získanými při jednotlivých operacích jsou na obrázku 33) zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná měřicí kartou NI 9234 při chodu naprázdno včetně vyznačených frekvenčních pásem.

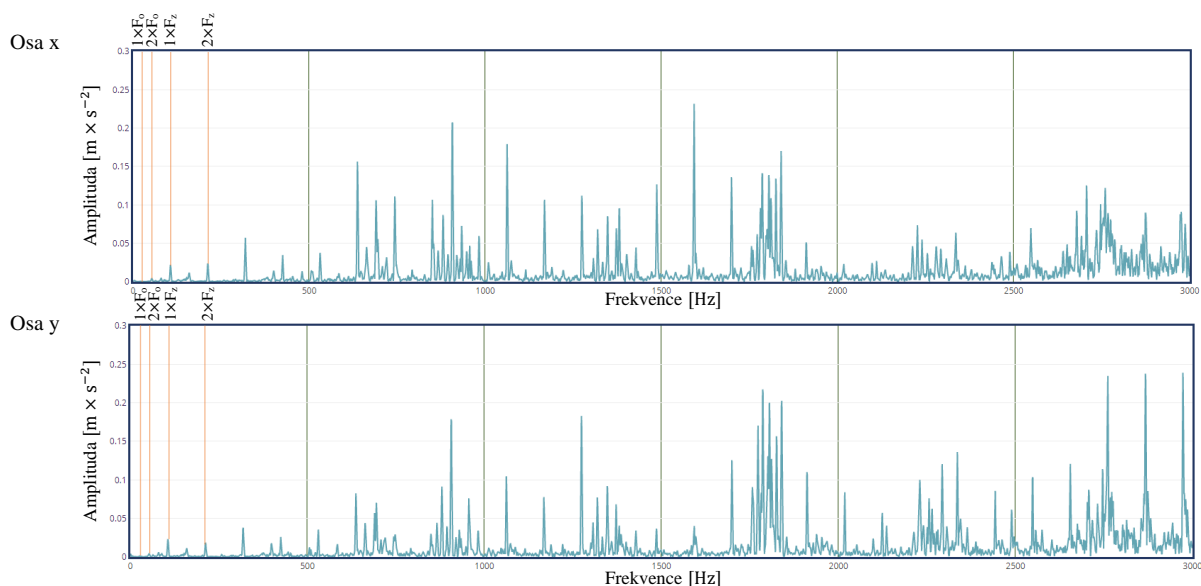


Obr. 33) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, chod naprázdno) s vyznačenými frekvenční pásmy.

Ve frekvenčních spektrech vibrací jsou zvýrazněny základní otáčková frekvence ($1 \times F_0$) a její harmonický násobek ($2 \times F_0$), a také frekvence dotyku zubů ($1 \times F_z$) a její harmonický násobek ($2 \times F_z$). Frekvence dotyku zubů je základní otáčková frekvence vynásobená počtem zubů frézy.

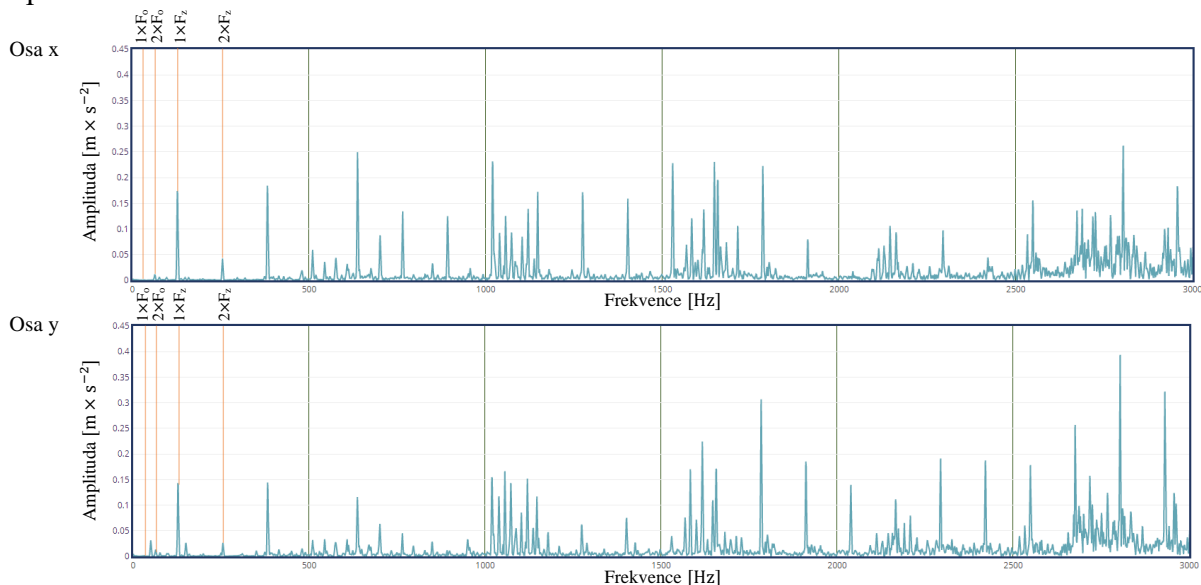
8.1.1 Čelní frézování

Na obr. 34) jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná jednotkou Multilog IMx-8 při čelním frézování obrobku 1.



Obr. 34) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, čelní frézování, obrobek 1).

Na obr. 35) jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná jednotkou Multilog IMx-8 při čelním frézování obrobku 2.



Obr. 35) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, čelní frézování, obrobek 2).

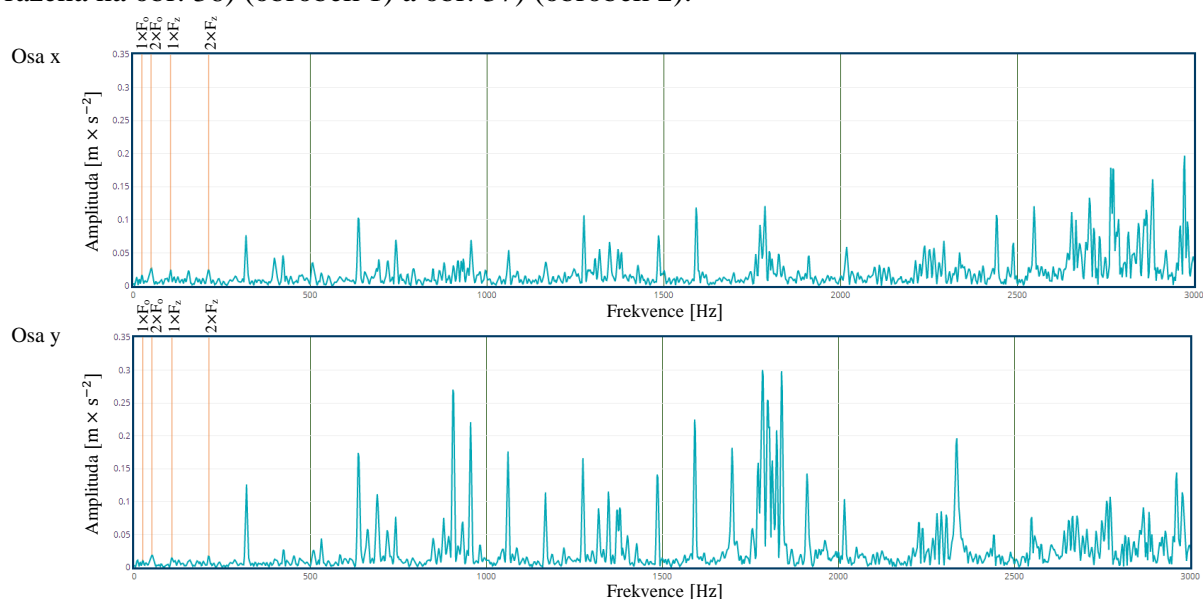
Ve frekvenčních spektrech vibrací je možné pozorovat výrazné amplitudy na frekvenci dotyku zubů, zejména při čelním frézování obrobku 2. U obrobku 2 jsou tyto frekvence vyšší oproti frekvencím u obrobku 1 vlivem zvýšení otáček. V tabulce 6) jsou uvedeny energie

frekvenčních spekter vibrací. Rozdíl hodnot energie spekter během frézování jednotlivých obrobků se vyskytuje především ve vyšších frekvenčních pásmech FP3 a FP4.

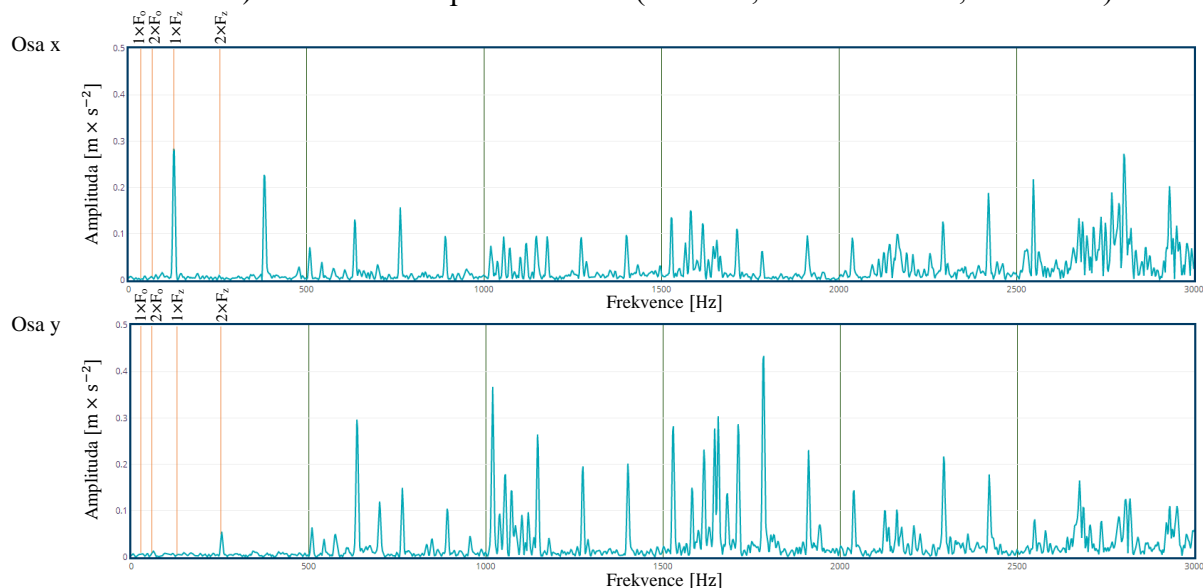
Tab 6) Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, čelní frézování).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	4,4808	5,3626	3,4729	4,5641
FP2	10,045	10,264	8,4202	8,5376
FP3	10,691	13,123	12,770	13,301
FP4	16,510	20,917	19,052	22,481

Frekvenční spektra vibrací získaná měřicí kartou NI 9234 při čelním frézování jsou zobrazena na obr. 36) (obrobek 1) a obr. 37) (obrobek 2).



Obr. 36) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, čelní frézování, obrobek 1).



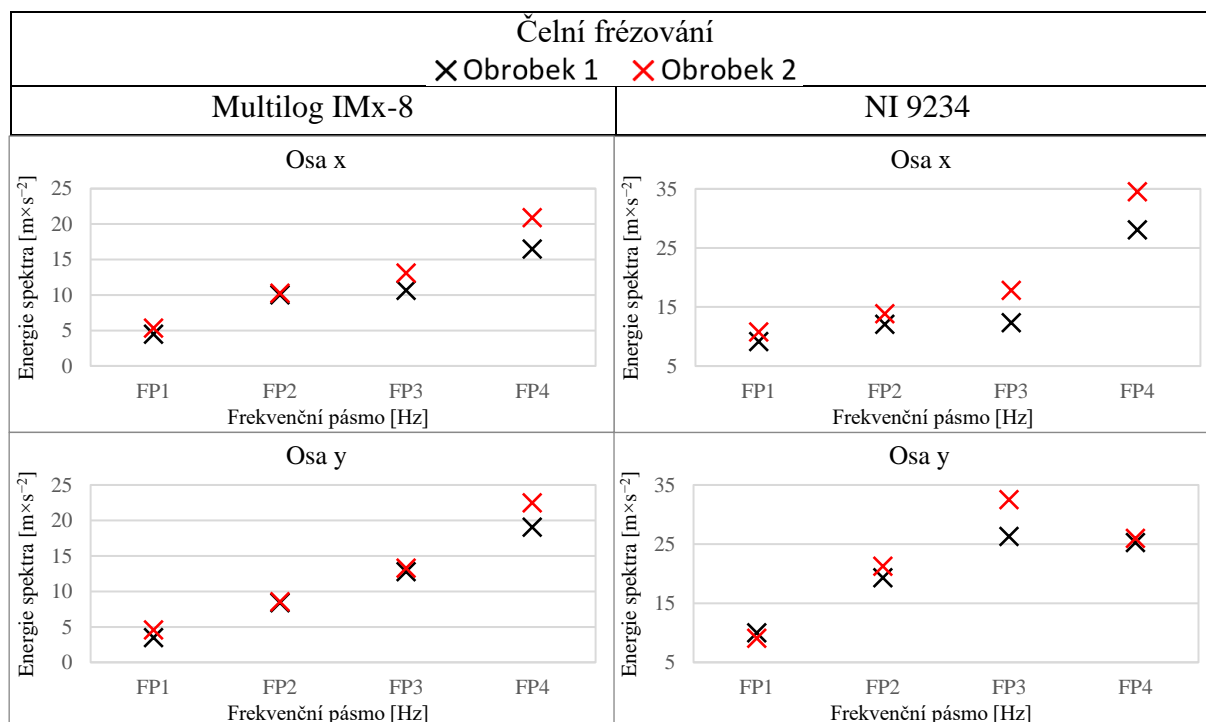
Obr. 37) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, čelní frézování, obrobek 2).

Ve frekvenčních spektrech vibrací získaných při čelním frézování pomocí měřicí karty NI 9234 je možné pozorovat výraznou amplitudu na frekvenci dotyku zubů u obrobku 2 v ose x, v ose y je výraznější amplituda na harmonickém násobku frekvence dotyku zubů. V tabulce 7) jsou uvedeny energie frekvenčních spekter vibrací. U obrobku 2 je možné pozorovat nižší hodnotu energie spektra v ose y ve frekvenčním pásmu FP1, v ostatních frekvenčních pásmech je energie spektra větší v obou osách.

Tab 7) Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, čelní frézování).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	9,1804	10,786	9,9863	9,0884
FP2	12,112	13,897	19,337	21,268
FP3	12,380	17,818	26,294	32,544
FP4	28,100	34,542	25,270	25,951

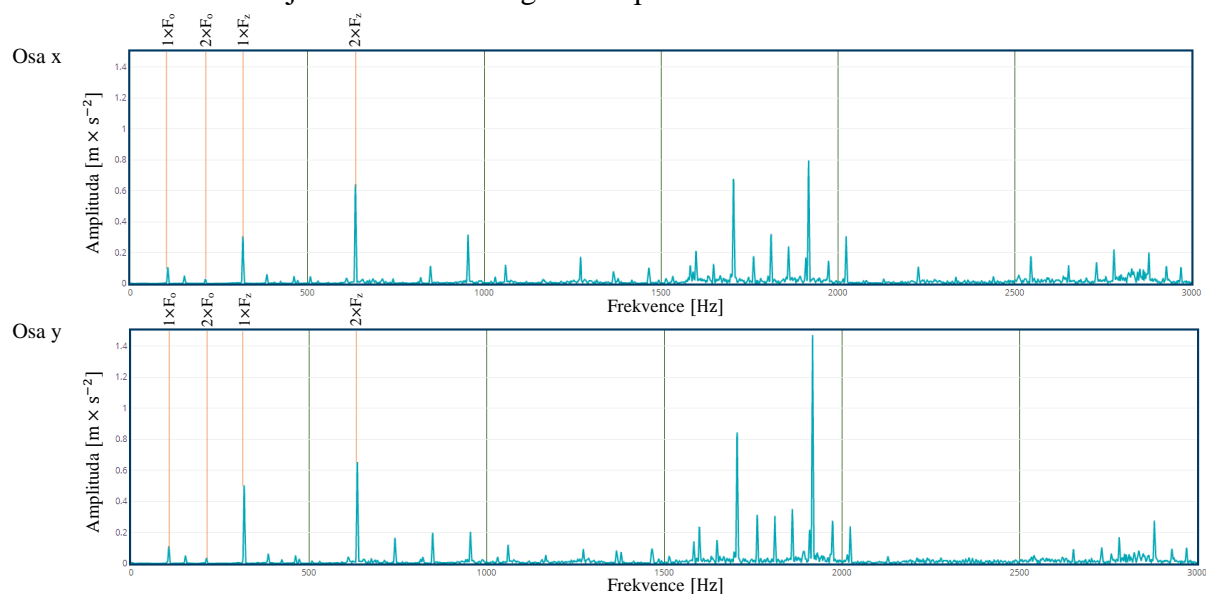
Na obrázku 38) je zobrazeno porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při čelním frézování.



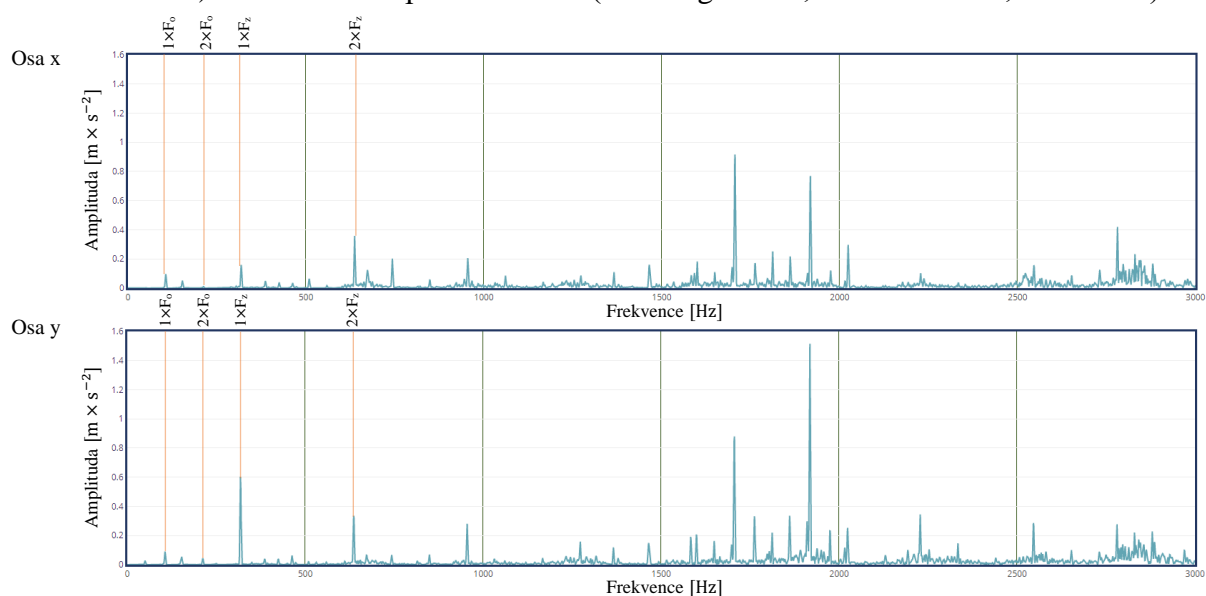
Obr. 38) Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při čelním frézování.

8.1.2 Frézování hran

Frekvenční spektra vibrací získaná monitorovací jednotkou Multilog IMx-8 při frézování hran obrobku 1 jsou zobrazena na obr. 39). Na obr. 40) jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná monitorovací jednotkou Multilog IMx-8 při frézování hran obrobku 2.



Obr. 39) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování hran, obrobek 1).



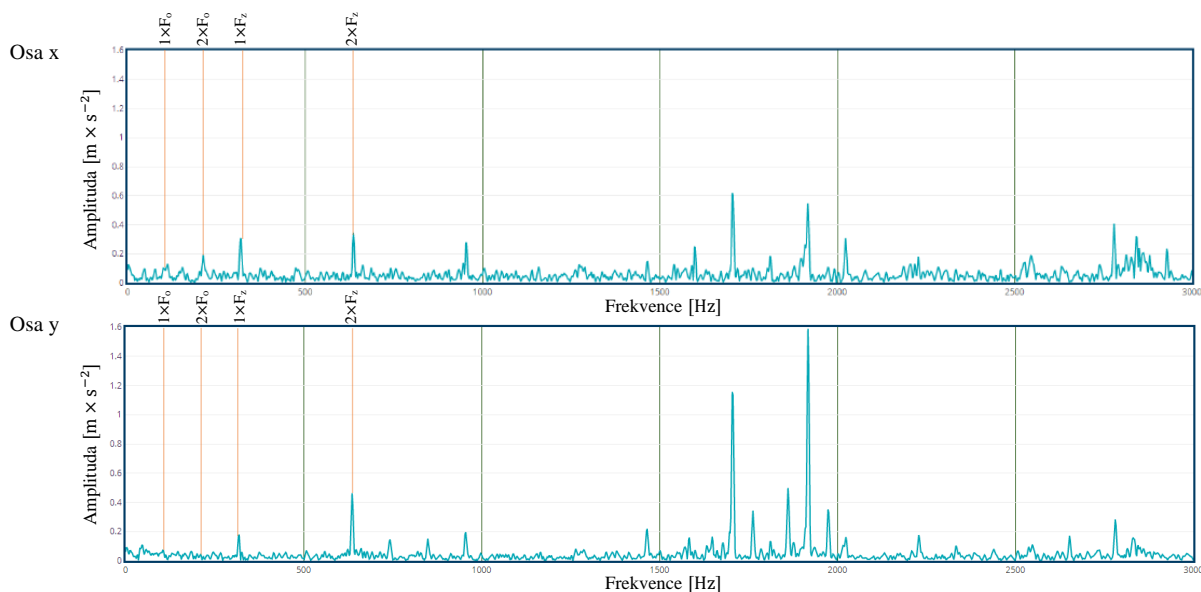
Obr. 40) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování hran, obrobek 2).

Ve frekvenčních spektrech je možné pozorovat výrazné amplitudy na frekvenci dotyku zubů i na harmonických násobcích této frekvence. V tabulce 8) jsou uvedeny energie frekvenčních spekter vibrací. U obrobku 2 je energie frekvenčních spekter vibrací větší ve všech frekvenčních pásmech.

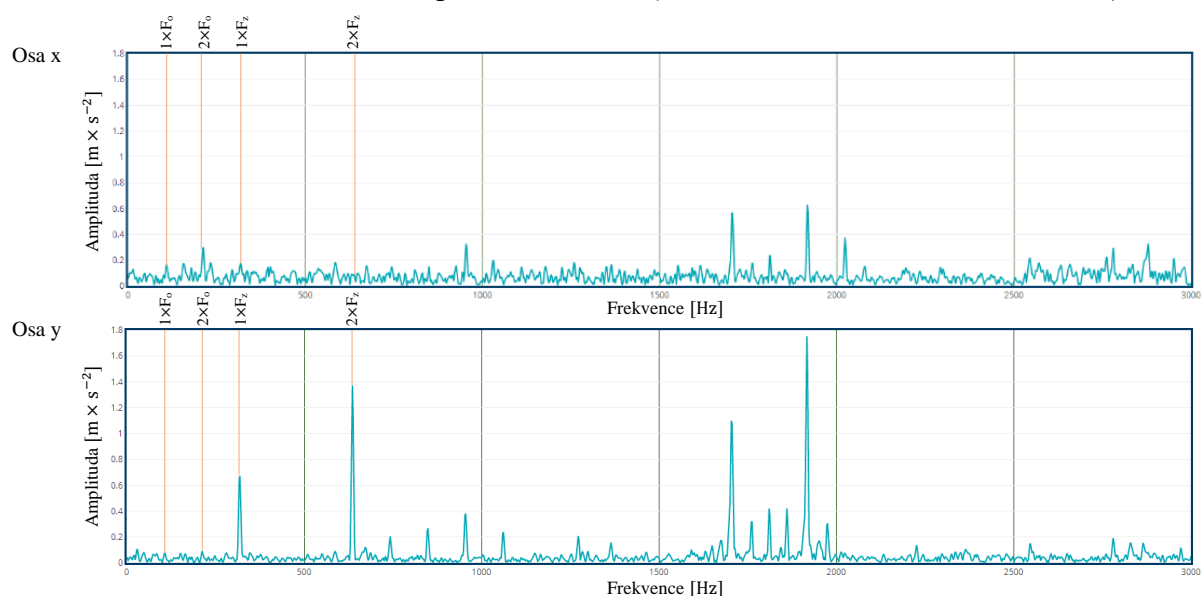
Tab 8) Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, frézování hran).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	7,3704	10,612	8,8298	12,909
FP2	8,702	9,2544	9,3814	9,9462
FP3	22,783	25,407	29,048	32,749
FP4	16,671	19,398	15,509	18,801

Frekvenční spektra vibrací získaná měřicí kartou NI 9234 při frézování hran jsou zobrazena na obrázku 41) (obrobek 1) a obrázku 42) (obrobek 2).



Obr. 41) Frekvenční spektrum vibrací (NI 9234, frézování hran, obrobek 1).



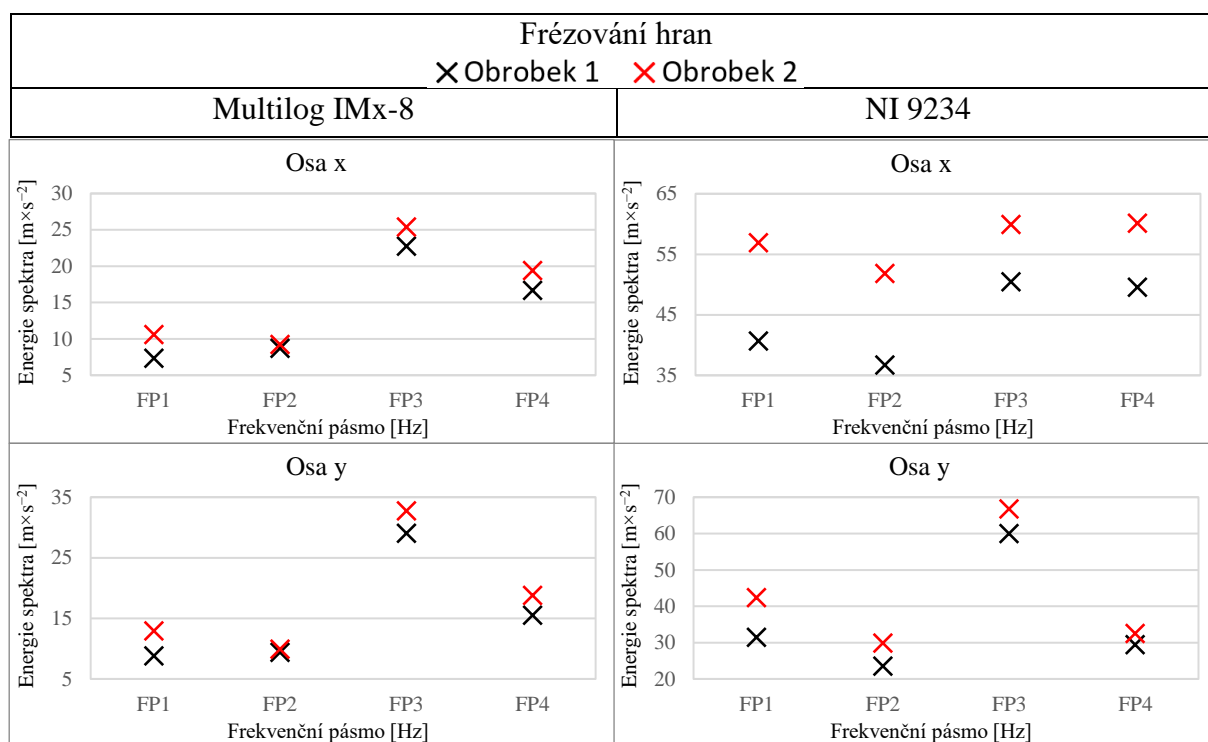
Obr. 42) Frekvenční spektrum vibrací (NI 9234, frézování hran, obrobek 2)

Ve frekvenčních spektrech je možné pozorovat výrazné amplitudy vibrací na frekvenci dotyku zubů a jejím harmonickém násobku. Energie frekvenčních spekter vibrací jsou uvedeny v tabulce 9). U obrobku 2 jsou energie spekter větší ve všech frekvenčních pásmech.

Tab 9) Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, frézování hran).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	40,715	56,949	31,456	42,341
FP2	36,735	51,84	23,523	29,872
FP3	50,47	59,965	60,029	66,743
FP4	49,598	60,161	29,448	32,529

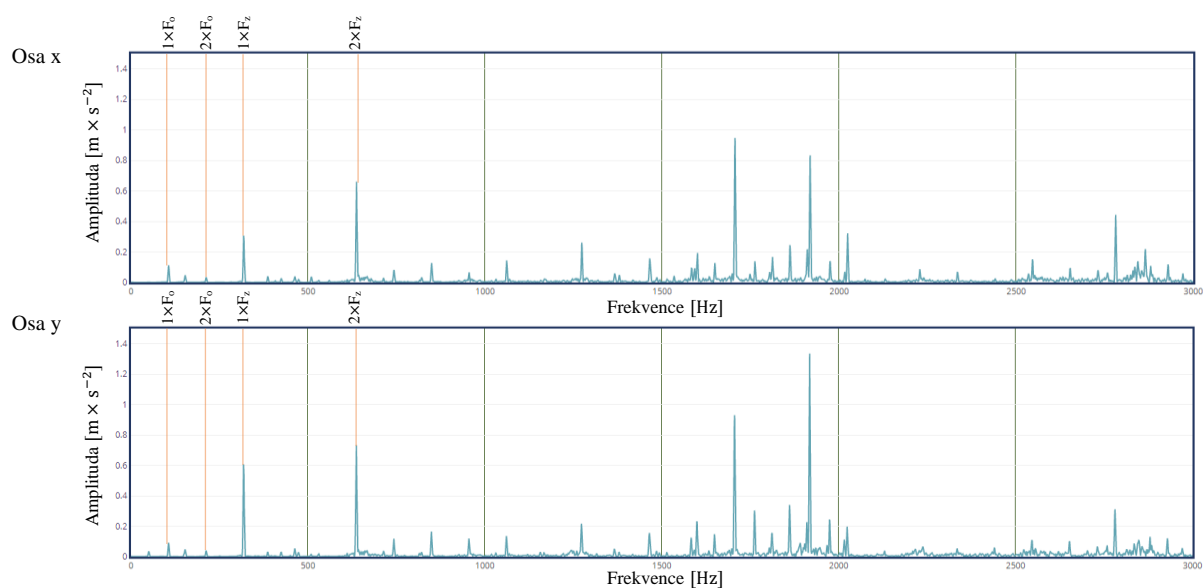
Na obrázku 43) je zobrazeno porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při frézování hran.



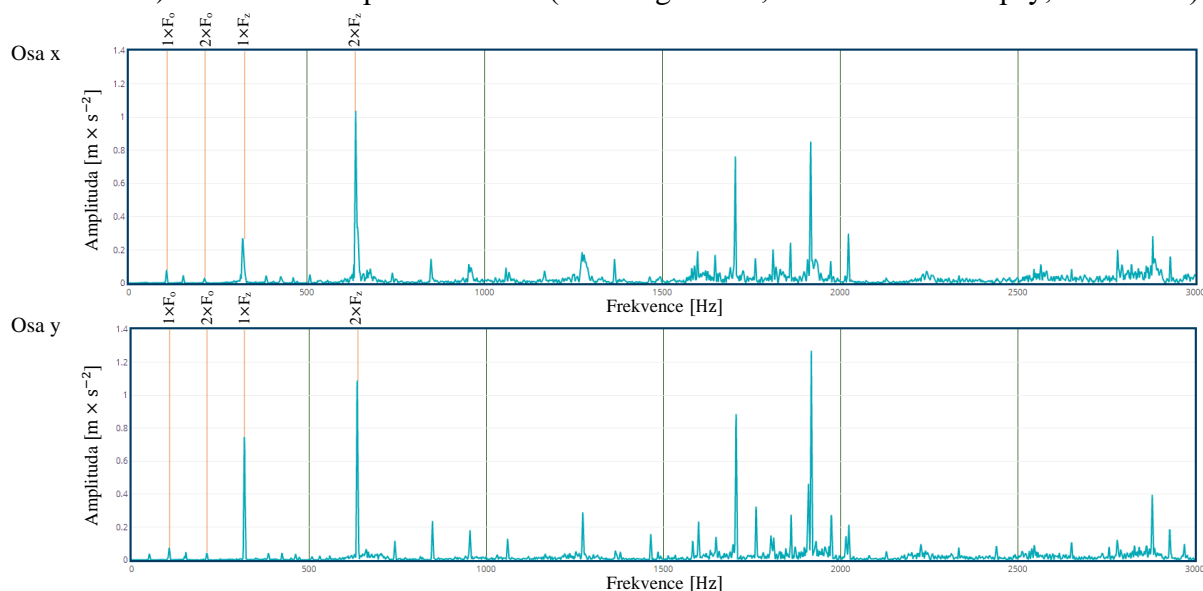
Obr. 43) Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při frézování hran.

8.1.3 Frézování obdélníkové kapsy

Na obrázku 44) jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací naměřená jednotkou Multilog IMx-8 při frézování obdélníkové kapsy obrobku 1 a na obrázku 45) při frézování obdélníkové kapsy obrobku 2.



Obr. 44) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování obd. kapsy, obrobek 1).



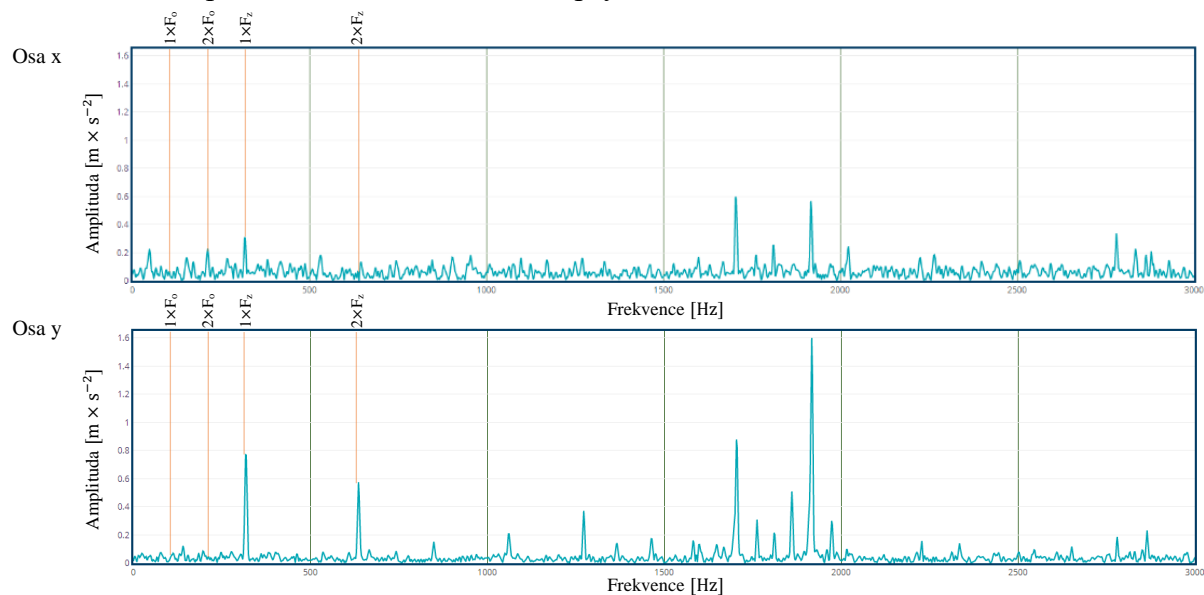
Obr. 45) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování obd. kapsy, obrobek 2).

Ve frekvenčních spektrech vibrací je možné pozorovat výrazné amplitudy na dotykové frekvenci zubů i na harmonickém násobku této frekvence. V tabulce 10) jsou uvedeny energie frekvenčních spekter vibrací. U obrobku 2 jsou energie frekvenčních spekter vibrací větší ve všech frekvenčních pásmech.

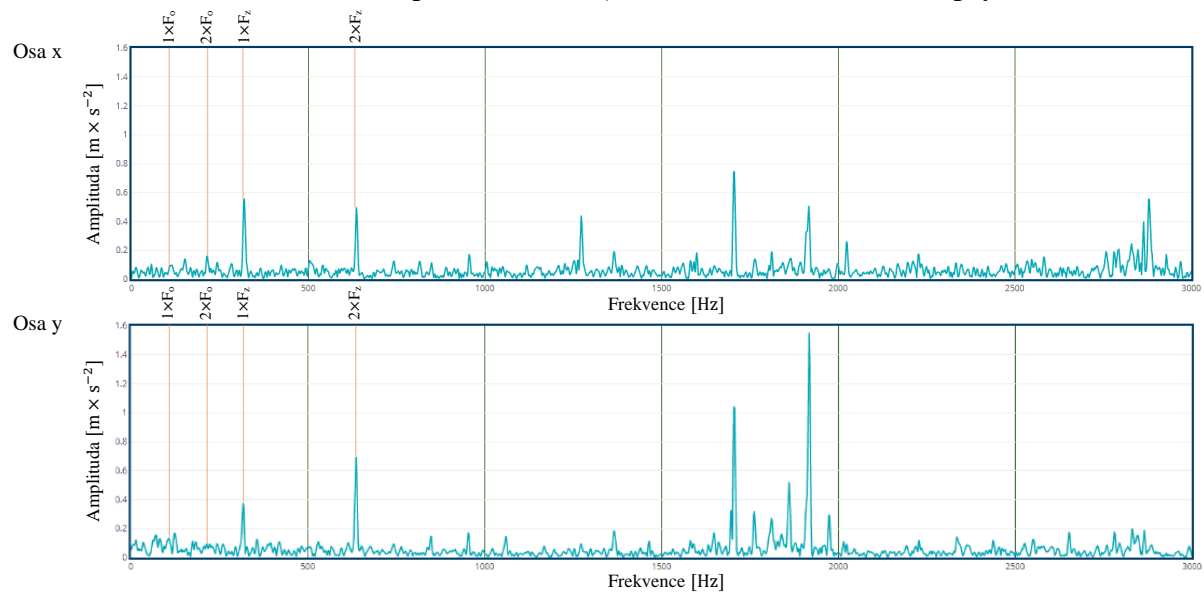
Tab 10) Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, frézování obd. kapsy).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	7,9834	9,9661	10,002	13,175
FP2	8,1318	10,416	9,0071	11,547
FP3	22,417	26,058	27,773	32,531
FP4	15,793	16,81	15,814	19,055

Frekvenční spektra vibrací získaná měřicí kartou NI 9234 při frézování obdélníkové kapsy obrobku 1 jsou zobrazena na obr. 46) a na obr. 47) jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná při frézování obdélníkové kapsy obrobku 2.



Obr. 46) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování obd. kapsy, obrobek 1).



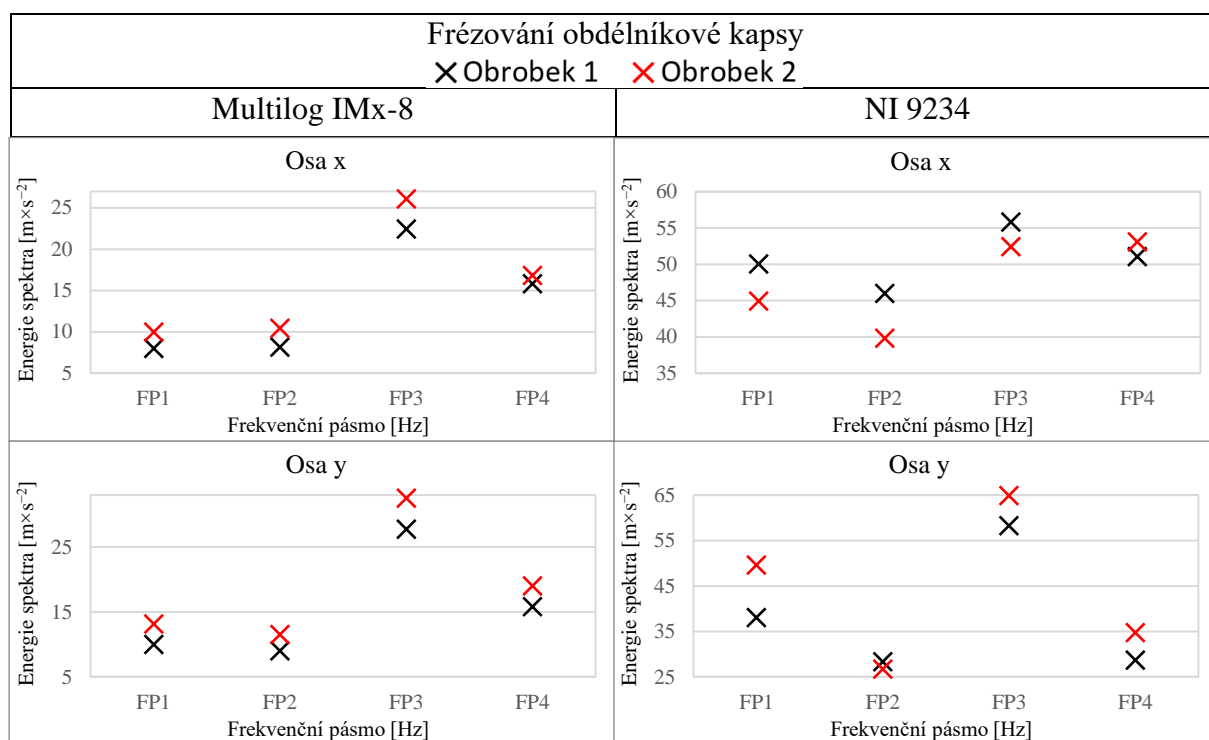
Obr. 47) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování obd. kapsy, obrobek 2).

Ve frekvenčních spektrech vibrací je možné pozorovat zvýšené amplitudy na frekvenci dotyku zubů i na harmonickém násobku této frekvence. V tabulce 11) jsou uvedeny energie frekvenčních spekter vibrací. U obrobku 2 je energie frekvenčního spektra vibrací vyšší než u obrobku 1 v ose y ve všech frekvenčních pásmech kromě pásma FP2. V ose x je vyšší energie spektra u obrobku 1 ve všech frekvenčních pásmech kromě pásma FP4.

Tab 11) Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, frézování obd. kapsy).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	50,044	44,901	38,081	49,654
FP2	45,990	39,821	28,326	26,707
FP3	55,796	52,418	58,258	64,919
FP4	51,037	53,074	28,677	34,788

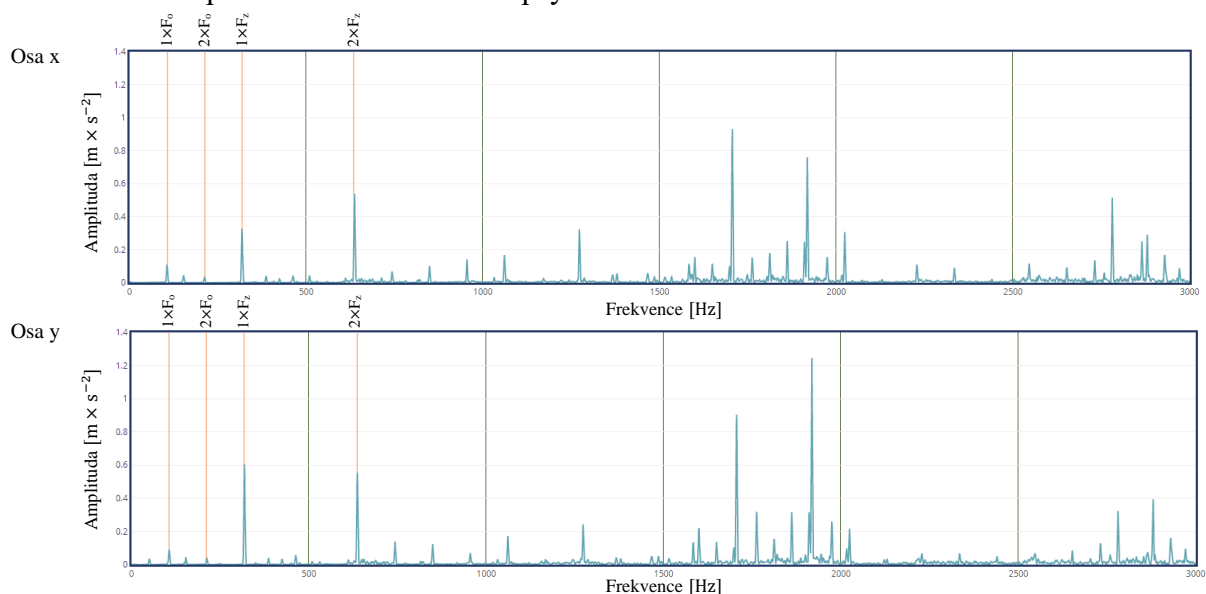
Na obrázku 48) je zobrazeno porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při frézování obdélníkové kapsy.



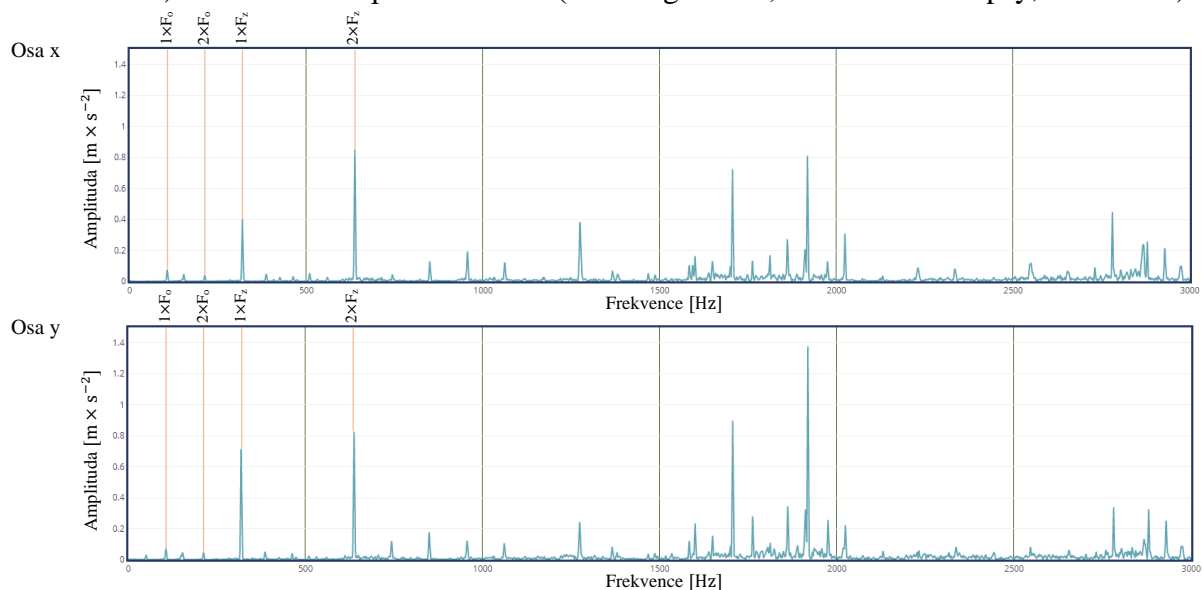
Obr. 48) Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při frézování obd. kapsy.

8.1.4 Frézování kruhové kapsy

Frekvenční spektra vibrací získaná z měření jednotkou Multilog IMx-8 při frézování kruhové kapsy obrobku 1 jsou zobrazena na obr. 49) a na obr. 50) jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná při frézování kruhové kapsy obrobku 2.



Obr. 49) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování kr. kapsy, obrobek 1).



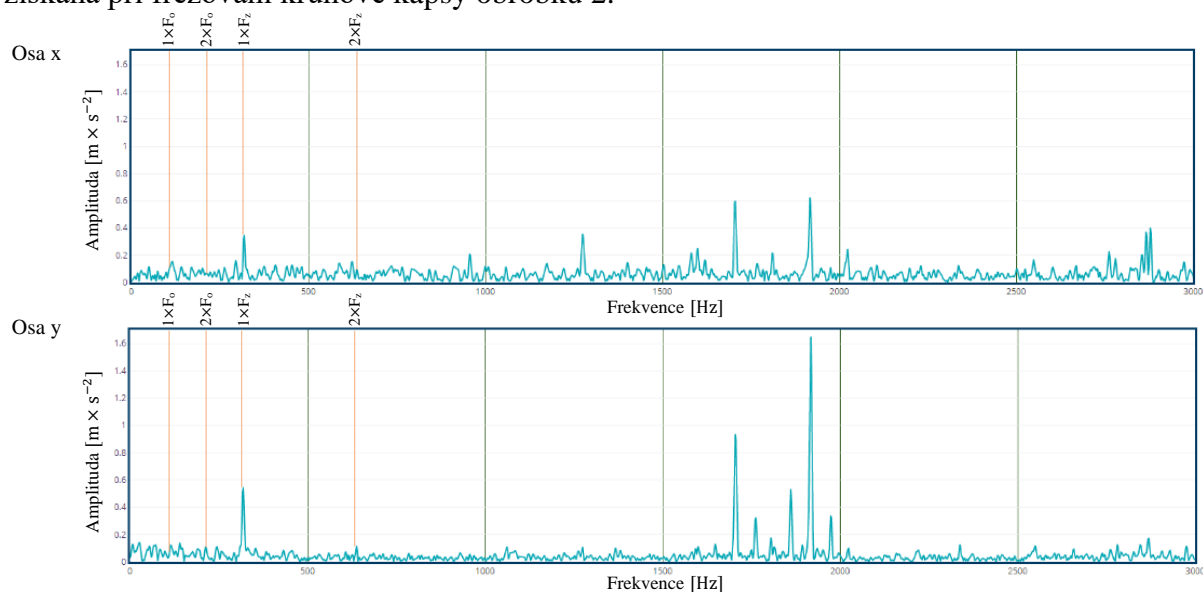
Obr. 50) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování kr. kapsy, obrobek 2).

Ve frekvenčních spektrech vibrací je možné pozorovat výrazné amplitudy na dotykové frekvenci zubů i na harmonickém násobku této frekvence. V tabulce 12) jsou uvedeny energie frekvenčních spekter vibrací. U obrobku 2 jsou energie spekter větší než u obrobku 1 ve všech frekvenčních pásmech.

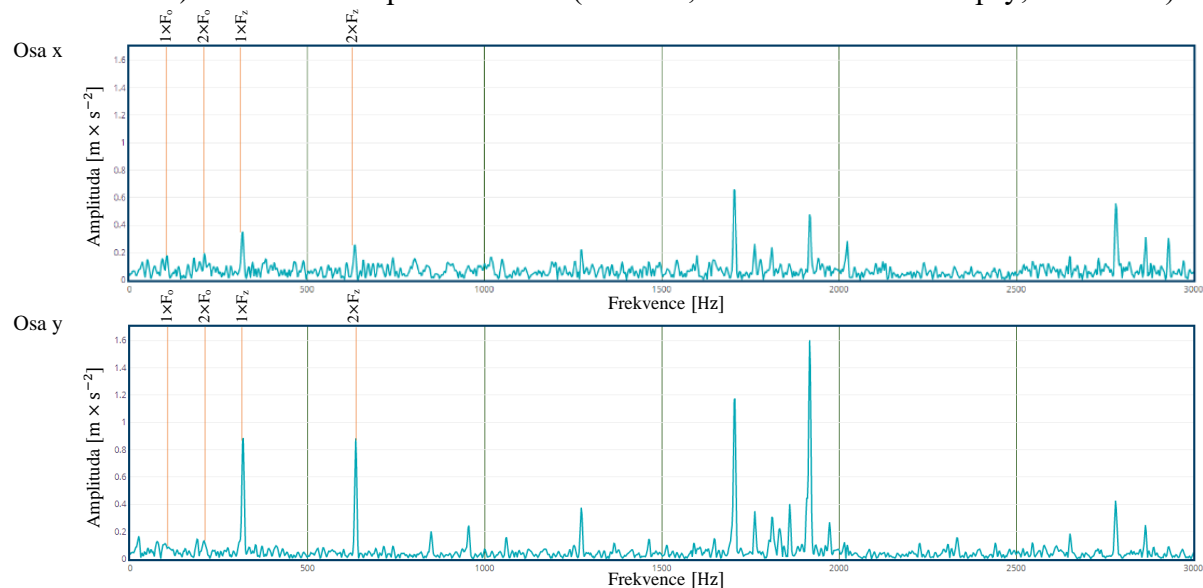
Tab 12) Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, frézování kruhové kapsy).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	6,8564	8,8758	8,6383	10,759
FP2	6,9785	9,5635	7,5826	9,4077
FP3	20,740	23,398	25,577	30,618
FP4	14,978	20,247	15,187	19,207

Frekvenční spektra vibrací získaná měřicí kartou NI 9234 při frézování kruhové kapsy obrobku 1 jsou zobrazena na obr. 51) a na obr. 52) jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná při frézování kruhové kapsy obrobku 2.



Obr. 51) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování kruhové kapsy, obrobek 1).



Obr. 52) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování kruhové kapsy, obrobek 2).

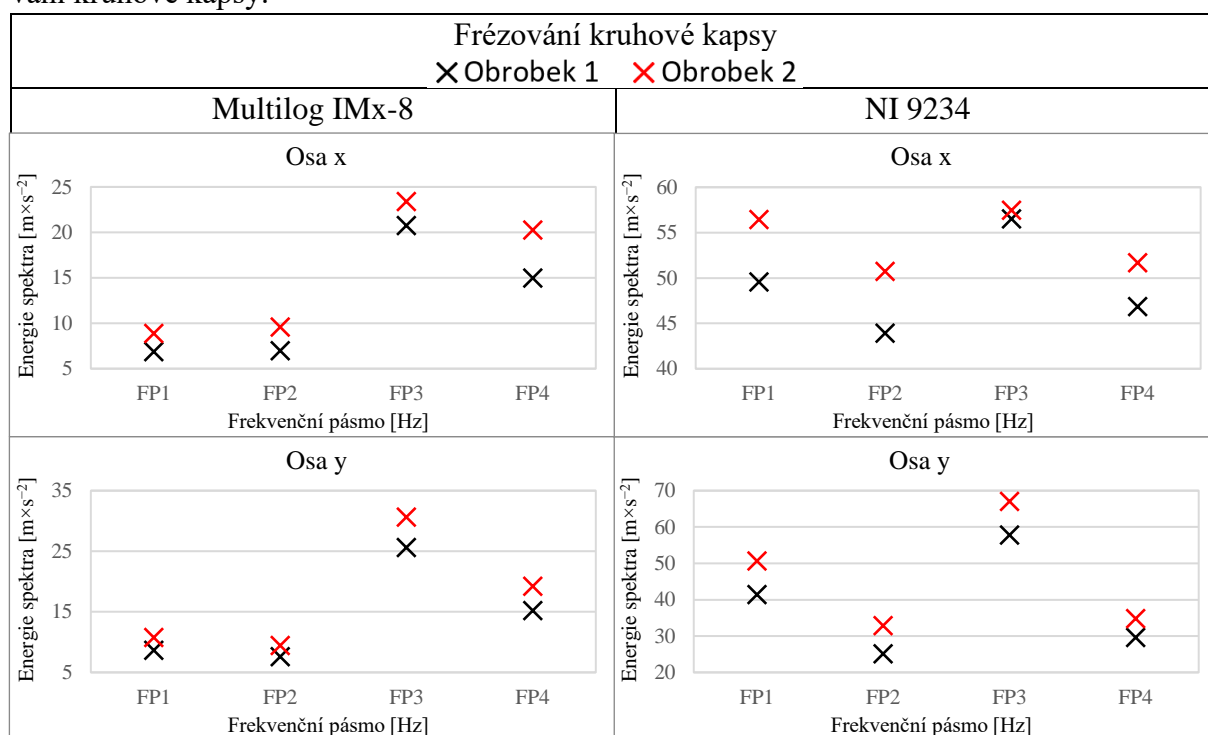
Ve frekvenčních spektrech vibrací je možné pozorovat výrazné amplitudy na frekvenci dotyku zubů i na harmonickém násobku této frekvence. V tabulce 13) jsou uvedeny energie

frekvenčních spekter vibrací. U obrobku 2 jsou energie spekter větší než u obrobku 1 v obou osách ve všech frekvenčních pásmech.

Tab 13) Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, frézování kruhové kapsy).

Frekvenční pásmo	Energie spektra [$\text{m} \times \text{s}^{-2}$]			
	Osa x		Osa y	
	Obrobek 1	Obrobek 2	Obrobek 1	Obrobek 2
FP1	49,559	56,443	41,393	50,637
FP2	43,924	50,730	25,061	32,857
FP3	56,498	57,477	57,744	67,022
FP4	46,848	51,674	29,598	34,770

Na obrázku 53) je zobrazeno porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při frézování kruhové kapsy.



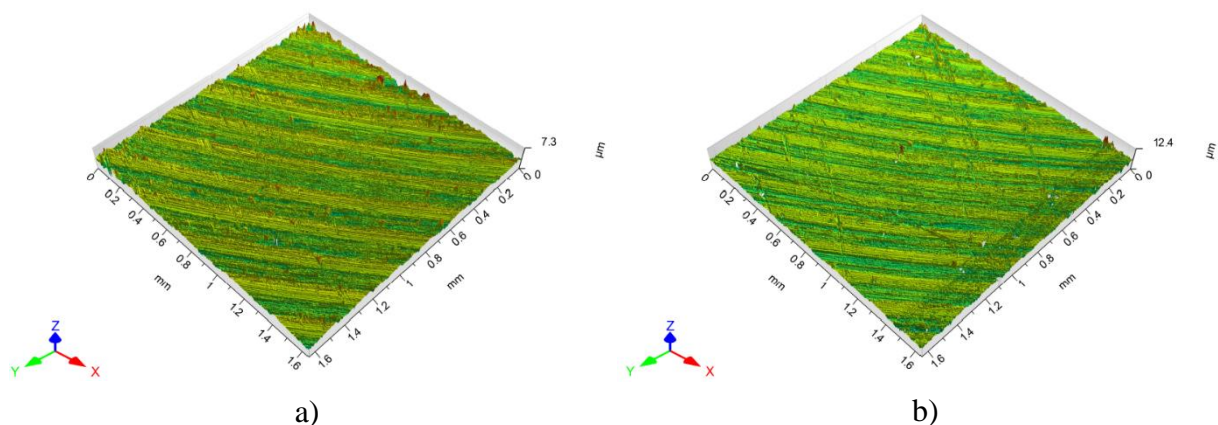
Obr. 53) Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při obrábění kruhové kapsy.

8.2 Vyhodnocení kvality povrchu

V této podkapitole jsou porovnány vybrané profilové parametry drsnosti povrchu a plošné parametry drsnosti povrchu získané ze snímků předem definovaných míst v oblastech provádění jednotlivých operací obrábění obou obrobků. U R-parametrů je udávána jejich průměrná hodnota.

8.2.1 Měření 1

Měření 1 je provedeno v místě čelního frézování obrobků. Snímek povrchu v místě měření 1 obrobku 1 je zobrazen na obrázku 54a). Na obrázku 54b) je zobrazen snímek povrchu v místě měření 1 obrobku 2. Na snímcích je dobře viditelné rozdílné množství rýh od frézování, které je způsobené odlišnými reznými podmínkami. V tabulce 14) jsou uvedeny parametry drsnosti povrchu získané při měření 1.



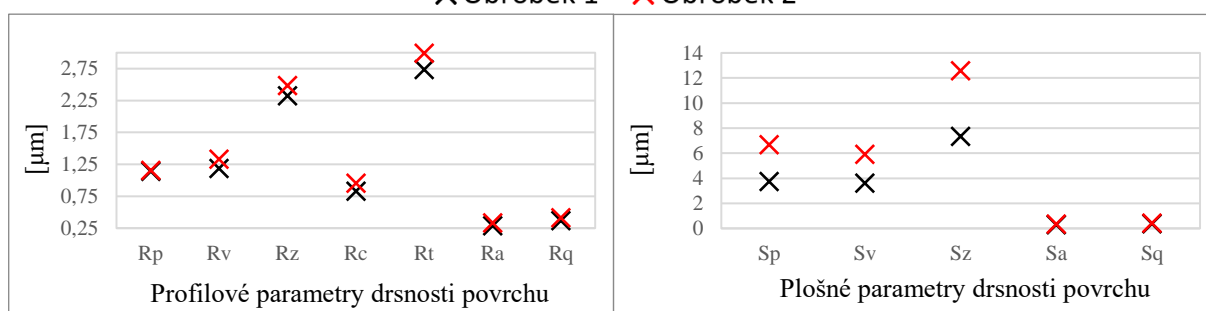
Obr. 54) Snímek povrchu (měření 1): a) obrobek 1, b) obrobek 2.

Tab 14) Parametry drsnosti povrchu (měření 1).

Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2	Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2
R_p [μm]	1,1428	1,1533	S_p [μm]	3,7383	6,6620
R_v [μm]	1,1841	1,3304	S_v [μm]	3,6073	5,9024
R_z [μm]	2,3269	2,4837	S_z [μm]	7,3456	12,564
R_c [μm]	0,82733	0,95628	S_a [μm]	0,28648	0,33432
R_t [μm]	2,7351	2,9928	S_q [μm]	0,37155	0,42614
R_a [μm]	0,28688	0,33013	S_{sk} [-]	-0,085967	-0,2313
R_q [μm]	0,36720	0,41248	S_{ku} [-]	5,4220	6,1000
R_{sk} [-]	-0,062342	-0,2762			
R_{ku} [-]	3,7465	3,6454			

Na obrázku 55) je zobrazeno porovnání parametrů drsnosti povrchu získaných při měření 1 obou obrobků. Z tohoto srovnání je snadno viditelné, že hodnoty vyhodnocovaných profilových i plošných parametrů v místě měření 1 jsou vyšší u obrobku 2.

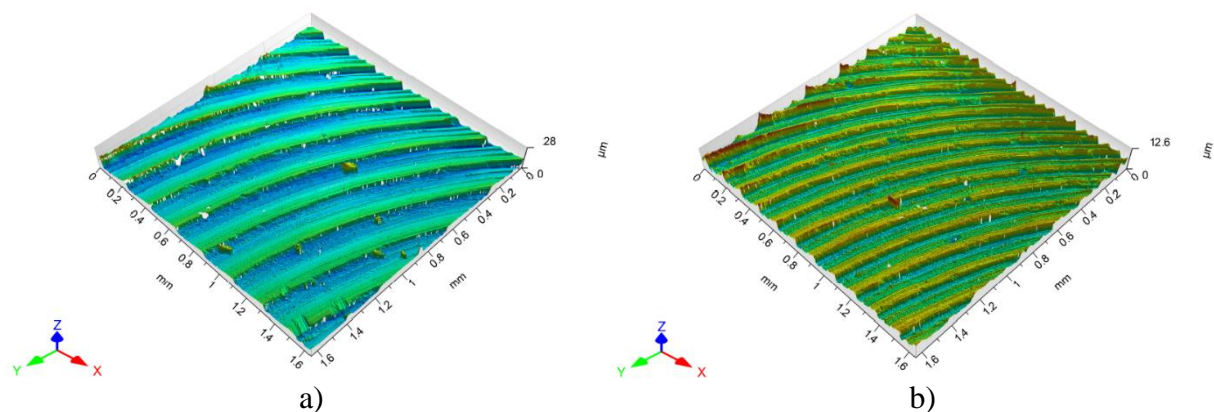
× Obrobek 1 × Obrobek 2



Obr. 55) Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 1).

8.2.2 Měření 2

Měření 2 je provedeno v místě frézování obdélníkových kapes obrobků. Snímek povrchu v místě měření 2 obrobku 1 je zobrazen na obrázku 56a). Na obrázku 56b) je zobrazen snímek povrchu v místě měření 2 obrobku 2. Na snímcích je dobře viditelné rozdílné množství rýh od frézování, které je způsobené odlišnými reznými podmínkami. V tabulce 15) jsou uvedeny parametry drsnosti povrchu získané při měření 2.



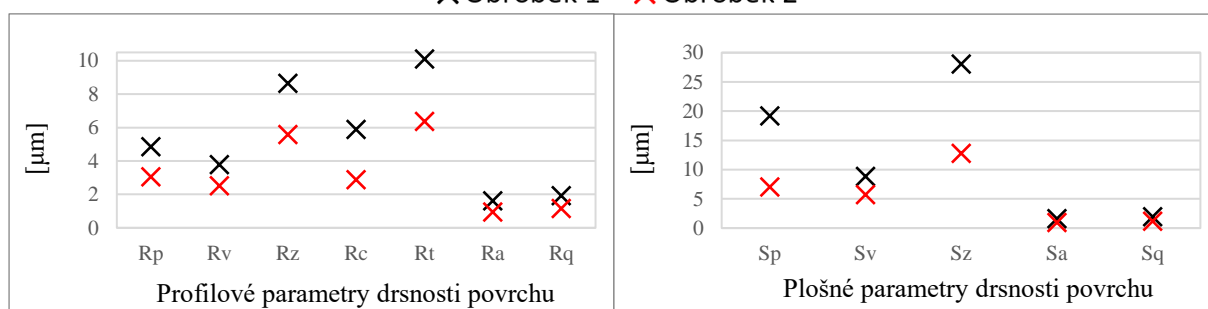
Obr. 56) Snímek povrchu (měření 2): a) obrobek 1, b) obrobek 2.

Tab 15) Parametry drsnosti povrchu (měření 2).

Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2	Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2
R_p [μm]	4,8683	3,0665	S_p [μm]	19,213	7,0588
R_v [μm]	3,7936	2,5194	S_v [μm]	8,8493	5,7276
R_z [μm]	8,6620	5,5859	S_z [μm]	28,062	12,786
R_c [μm]	5,8980	2,8801	S_a [μm]	1,6355	0,95950
R_t [μm]	10,122	6,3761	S_q [μm]	1,9442	1,1801
R_a [μm]	1,6270	0,95743	S_{sk} [-]	0,27452	0,15991
R_q [μm]	1,9250	1,1651	S_{ku} [-]	2,7878	3,0216
R_{sk} [-]	0,24333	0,16310			
R_{ku} [-]	2,4020	2,6184			

Hodnoty vyhodnocovaných profilových i plošných parametrů v místě měření 2 jsou vyšší u obrobku 1, jak je vidět na obrázku 57), kde je zobrazeno porovnání parametrů drsnosti povrchu získaných při měření 2 obou obrobků.

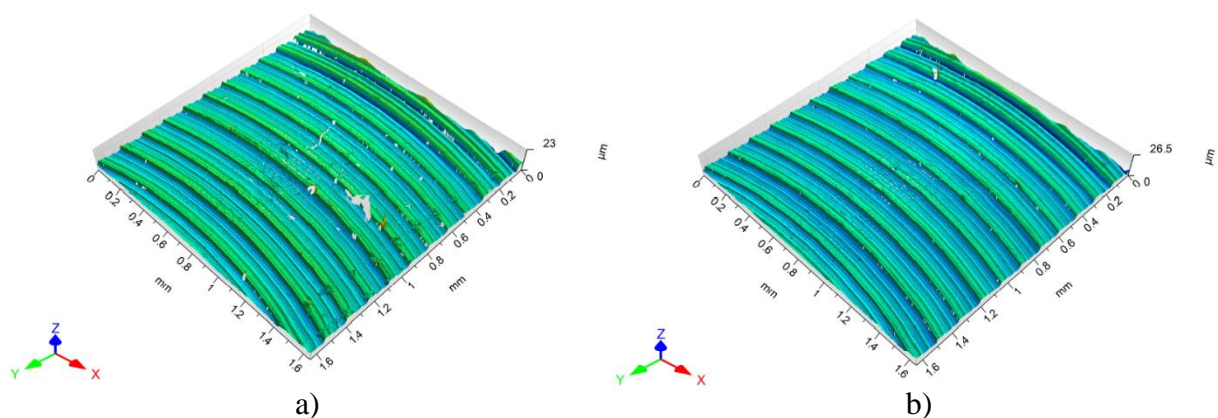
× Obrobek 1 × Obrobek 2



Obr. 57) Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 2).

8.2.3 Měření 3

Měření 3 je provedeno v místě frézování kruhových kapes obrobků. Snímek povrchu v místě měření 3 obrobku 1 je zobrazen na obrázku 58a). Na obrázku 58b) je zobrazen snímek povrchu v místě měření 3 obrobku 2. V tabulce 16) jsou uvedeny parametry drsnosti povrchu získané při měření 3.



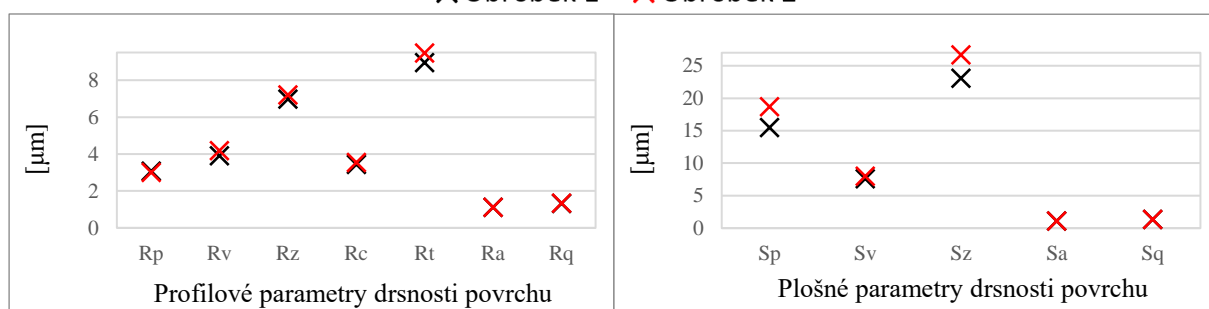
Obr. 58) Snímek povrchu (měření 3): a) obrobek 1, b) obrobek 2.

Tab 16) Parametry drsnosti povrchu (měření 3).

Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2	Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2
R_p [μm]	3,0760	3,0054	S_p [μm]	15,470	18,677
R_v [μm]	3,9053	4,1957	S_v [μm]	7,6131	8,0122
R_z [μm]	6,9813	7,2012	S_z [μm]	23,083	26,689
R_c [μm]	3,4443	3,5464	S_a [μm]	1,1040	1,1041
R_t [μm]	8,9576	9,4778	S_q [μm]	1,3285	1,3501
R_a [μm]	1,1157	1,1177	S_{sk} [-]	-0,2386	-0,45083
R_q [μm]	1,3305	1,3494	S_{ku} [-]	4,0034	4,5598
R_{sk} [-]	-0,1447	-0,27912			
R_{ku} [-]	3,0157	3,1667			

Na obrázku 59) je zobrazeno porovnání parametrů drsnosti povrchu získaných při měření 3 obou obrobků. Z tohoto srovnání je patrné, že hodnoty vyhodnocovaných profilových i plošných parametrů v místě měření 3 jsou u obou obrobků téměř shodné.

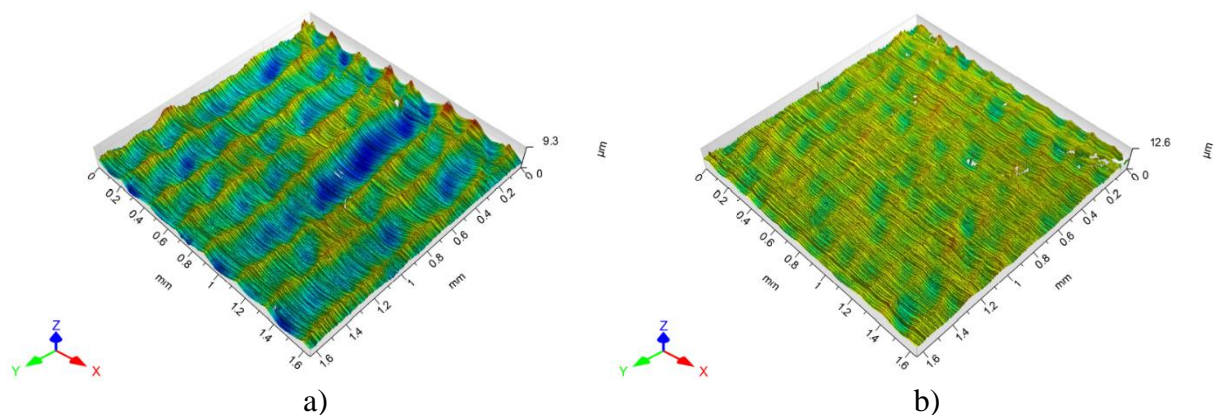
✕ Obrobek 1 ✕ Obrobek 2



Obr. 59) Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 3).

8.2.4 Měření 4

Měření 4 je provedeno v místě frézování hran obrobků. Snímek povrchu v místě měření 4 obrobku 1 je zobrazen na obrázku 60a). Na obrázku 60b) je zobrazen snímek povrchu v místě měření 4 obrobku 2. V tabulce 17) jsou uvedeny parametry drsnosti povrchu získané při měření 4.



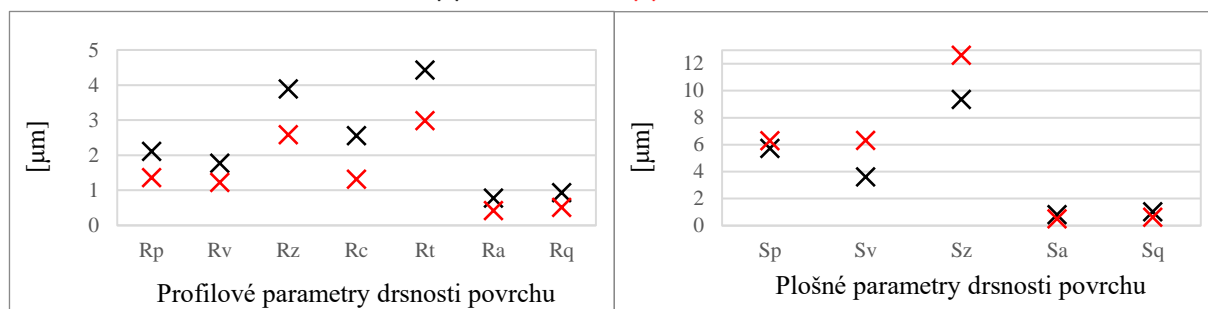
Obr. 60) Snímek povrchu (měření 4): a) obrobek 1, b) obrobek 2.

Tab 17) Parametry drsnosti povrchu (měření 4).

Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2	Parametr	Obrobek 1	Obrobek 2
R_p [μm]	2,1107	1,3623	S_p [μm]	5,7349	6,3137
R_v [μm]	1,7746	1,2226	S_v [μm]	3,6254	6,3365
R_z [μm]	3,8853	2,5849	S_z [μm]	9,3603	12,650
R_c [μm]	2,5546	1,3155	S_a [μm]	0,83189	0,50804
R_t [μm]	4,4229	2,9854	S_q [μm]	1,0348	0,63877
R_a [μm]	0,77644	0,41551	S_{sk} [-]	0,024388	-0,067455
R_q [μm]	0,93533	0,51524	S_{ku} [-]	2,9654	3,4776
R_{sk} [-]	0,12193	0,16578			
R_{ku} [-]	2,3435	2,9486			

Hodnoty vyhodnocovaných profilových parametrů v místě měření 4 jsou vyšší u obrobku 1, jak je vidět na obrázku 61), kde je zobrazeno porovnání parametrů drsnosti povrchu získaných při měření 4 obou obrobků. Hodnoty vyhodnocovaných plošných parametrů zobrazených na obrázku 61) v místě měření 4 jsou kromě parametrů S_a a S_q mírně vyšší u obrobku 2.

× Obrobek 1 × Obrobek 2



Obr. 61) Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 4).

9 ZHODNOCENÍ

Cílem experimentálního měření této diplomové práce bylo ověření schopnosti posouzení kvality obráběcího procesu pomocí naměřených vibrací vřetene obráběcího zařízení, tedy rozpoznání rozdílů mezi vibracemi získanými při obrábění ideálními řeznými podmínkami a vibracemi získanými při obrábění neideálními řeznými podmínkami. Dále byla z důvodu ověření vlivu použitých podmínek obrábění na kvalitu povrchu obrobků vyhodnocena kvalita povrchu testovacích vzorků.

Obrábění totožného testovacího vzorku bylo provedeno dvakrát. Testovací vzorek obráběný ideálními řeznými podmínkami je označen jako obrobek 1, jako obrobek 2 je označen testovací vzorek obráběný neideálními podmínkami. Testovací vzorek byl zhotoven pomocí několika operací (čelní frézování, frézování hran, frézování obdélníkové kapsy a frézování kruhové kapsy).

Měření vibrací vřetene obráběcího zařízení bylo provedeno zároveň třemi jednoosými akcelerometry připojenými k monitorovacímu systému SKF Multilog IMx-8 a tříosým akcelerometrem připojeným k měřicí kartě NI 9234. Vyhodnocení naměřených vibrací bylo provedeno pomocí energie frekvenčních spekter vibrací ve čtyřech frekvenčních pásmech FP1 (2–750 Hz), FP2 (750–1500 Hz), FP3 (1500–2250 Hz) a FP4 (2250–3000 Hz). Rozmezí těchto frekvenčních pásem bylo zvoleno tak, aby pásma rovnoměrně pokryla celý frekvenční rozsah vyhodnocovaných frekvenčních spekter vibrací. Vyhodnocení bylo zaměřeno na vibrace v osách x a y. Vibrace v ose z jsou při frézování prováděném v rámci praktické části této diplomové práce méně výrazné oproti vibracím v osách x a y, mají tedy pro toto experimentální měření menší význam.

U testovacích vzorků bylo pomocí bezdotykového 3D profilometru Taylor Hobson Talysurf CCI Lite provedeno vyhodnocení kvality povrchu v předem definovaných místech obou vzorků, která byla zvolena v místech provádění jednotlivých operací obrábění. U obou obrobků byla snaha provést měření na stejných místech, ale vzhledem k velikosti vyhodnocované plochy jsou tato místa stejná pouze přibližně.

Při obrábění neideálními řeznými podmínkami bylo očekáváno naměření vyšších vibrací (vyšší energie frekvenčního spektra vibrací) oproti vibracím naměřeným při obrábění ideálními řeznými podmínkami. Dále byl očekáván vliv vyšších vibrací na kvalitu obráběného povrchu testovacího vzorku, který by se při porovnání vyhodnocovaných parametrů drsnosti povrchu obou testovacích vzorků projevil nižší kvalitou povrchu vzorku obráběného neideálními podmínkami.

9.1 Zhodnocení výsledků měření vibrací

9.1.1 Měření pomocí monitorovacího systému SKF Multilog IMx-8

Při čelním frézování je energie frekvenčních spekter vibrací obrobku 2 ve srovnání s energií frekvenčních spekter vibrací obrobku 1 průměrně o 16 % větší. V ose x je tato hodnota průměrně vyšší o 18 % a v ose y o 14 %.

Energie spekter obrobku 2 během frézování hran je ve srovnání s energií spekter obrobku 1 průměrně větší o 21 %, přičemž v ose x jsou hodnoty energie spektra průměrně vyšší o 20 % a v ose y o 22 %.

Při frézování obdélníkové kapsy je energie spekter obrobku 2 větší průměrně o 22 % než energie spekter obrobku 1. Energie spekter v ose x je průměrně větší o 19 % a v ose y o 24 %.

Při frézování kruhové kapsy je rozdíl velikostí energií spekter obou obrobků největší. Energie spekter obrobku 2 je průměrně větší o 26 % než energie spekter obrobku 1. V ose x jsou hodnoty energie spektra průměrně vyšší o 29 % a v ose y o 24 %.

Energie frekvenčních spekter vibrací obrobku 2 jsou v porovnání s energiemi frekvenčních spekter vibrací obrobku 1 větší při všech operacích a průměrně jsou větší o 21 %. Hodnoty energie spekter obrobku 2 jsou vyšší ve všech frekvenčních pásmech každé operace.

9.1.2 Měření pomocí měřicí karty NI 9234

Při čelním frézování je energie frekvenčních spekter vibrací obrobku 2 průměrně větší o 16 % než energie frekvenčních spekter vibrací obrobku 1. V ose x je tato hodnota průměrně vyšší o 25 % a v ose y o 7 %. V ose y je ve frekvenčním pásmu FP1 energie spektra obrobku 2 menší o 9 % než energie spektra obrobku 1.

Energie spekter obrobku 2 jsou při frézování hran průměrně větší o 26 % než energie spekter obrobku 1, což je největší rozdíl ze všech operací. V ose x jsou hodnoty energie spektra průměrně vyšší o 30 % a v ose y o 21 %.

Při frézování obdélníkové kapsy je energie spekter obrobku 2 průměrně větší o 4 % než energie spekter obrobku 1. V ose x jsou hodnoty energie spektra obrobku 2 nižší ve všech frekvenčních pásmech kromě frekvenčního pásma FP4 a průměrně jsou nižší o 6 %, v ose y jsou hodnoty obrobku 2 průměrně vyšší o 14 %, ale ve frekvenčním pásmu FP2 je hodnota energie spektra nižší o 6 %.

Energie spekter obrobku 2 je při frézování kruhové kapsy v porovnání s energií spekter obrobku 1 průměrně větší o 16 %. V ose x jsou hodnoty energie spektra průměrně vyšší o 10 % a v ose y o 22 %.

Energie frekvenčních spekter vibrací obrobku 2 jsou ve srovnání s energiemi frekvenčních spekter vibrací obrobku 1 větší při všech operacích a průměrně jsou větší o 15 %. Při frézování obdélníkové kapsy jsou hodnoty energie spektra obrobku 2 vyšší pouze o 4 % a v ose x je energie spektra průměrně menší o 6 %. Energie spektra obrobku 2 v ose y je menší při čelním frézování ve frekvenčním pásmu FP1, a také při frézování obdélníkové kapsy ve frekvenčním pásmu FP2 v ose y a ve frekvenčním pásmu FP4 v ose x.

9.2 Zhodnocení výsledků měření kvality povrchu

Hodnoty vyhodnocovaných profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu získaných při měření 1 obou obrobků, které odpovídá oblasti, kde bylo provedeno čelní frézování, jsou vyšší u obrobku, který byl obráběn neideálními řeznými podmínkami (obrobku 2).

Vyšší hodnoty vyhodnocovaných profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu obrobku, který byl obráběn ideálními řeznými podmínkami (obrobku 1) byly získány při měření 2 a 4, které byly provedeny v oblastech frézování obdélníkových kapes a frézování hran.

Při měření 3, které odpovídá oblasti, kde bylo provedeno frézování kruhových kapes, byly získány téměř shodné hodnoty vyhodnocovaných profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu obou obrobků.

Rozdíly hodnot parametrů drsnosti povrchu testovacích vzorků nejsou výrazné, tudíž je i rozdíl kvality povrchu v místech provádění měření obou obrobků minimální. Pro přesnější vyhodnocení kvality povrchu testovacích vzorků by bylo vhodné provést měření kvality povrchu více míst v oblastech provádění jednotlivých operací a následně získané výsledky statisticky vyhodnotit.

9.3 Shrnutí dosažených výsledků

Vyhodnocení naměřených vibrací potvrdilo očekávání, že při obrábění neideálními řeznými podmínkami budou naměřeny vyšší vibrace než při obrábění ideálními řeznými podmínkami. Toto očekávání potvrdily oba způsoby měření, tedy měření třemi jednoosými akcelerometry připojenými k monitorovací jednotce SKF Multilog IMx-8 i trojosým akcelerometrem připojeným k měřicí kartě NI 9234. U měření trojosým akcelerometrem připojeným k měřicí kartě NI 9234 byly několikrát zaznamenány vyšší hodnoty energie frekvenčních spekter vibrací u obrobku obráběného ideálními řeznými podmínkami, i přesto převažovaly vyšší vibrace při obrábění obrobku obráběného neideálními řeznými podmínkami.

Očekávaný vliv vyšších vibrací na kvalitu povrchu se nepotvrdil a z dosažených výsledků je zřejmé, že oba obrobky obráběné různými řeznými podmínkami mají malé rozdíly v kvalitě povrchu. Vyhodnocení kvality povrchu bylo provedeno v oblastech jednotlivých operací obrábění, a to vždy jedenkrát v každé oblasti. Lepším řešením by bylo provést měření několikrát v každé oblasti a dosažené výsledky statisticky vyhodnotit, čímž by se získala lepší znalost kvality povrchu obrobků.

V předkládané diplomové práci se podařilo prokázat, že je možné pomocí monitorování vibrací při obrábění sledovat odchylky použitých podmínek obrábění od těch ideálních, případně další změny procesu obrábění, které se projeví změnou vibrací.

Odlišnost řezných podmínek obrábění byla dostatečná na projevení se ve velikosti naměřených vibrací, nebyla však dostatečná pro projevení se v kvalitě povrchu obrobků. Výsledky této diplomové práce je možné využít jako základ pro další měření, například sérii měření vibrací při obrábění odlišnými řeznými podmínkami, kdy by řezné podmínky byly postupně upravovány tak, až by došlo k výraznějšímu projevení vibrací v kvalitě povrchu obrobků. Takovýmto způsobem by bylo možné například určit alarmové meze sledovaných vibrací konkrétního zařízení, při nichž kvalita povrchu určitého typu výrobku nebude vyhovovat stanoveným mezím.

Pro budoucí experimentální měření doporučuji provést větší množství měření, dále vést dokumentaci o provedených měřeních, ve které by byly uvedeny všechny podmínky provedených obrábění a také stav použitých nástrojů při obrábění.

Dalším námětem na měření je posouzení vlivu opotřebení nástroje použitého pro obrábění na velikost vibrací obráběcího systému, tedy provedení měření vibrací při obrábění několika nástroji stejného typu, které by ale byly odlišně opotřebené.

10 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá v teoretické i praktické části vibrační diagnostikou obráběcích strojů. Jedním z hlavních cílů této práce bylo popsat, provést a vyhodnotit sérii měření pomocí on-line monitorovacího zařízení a vyhodnotit dosažené výsledky.

Úvodní kapitoly této práce jsou věnovány popisu jednotlivých typů údržby, technické diagnostiky a vibrační diagnostiky, která je pro tuto diplomovou práci stěžejní. Jsou popsány jednotlivé druhy budících sil vibrací, možné měřené veličiny, typy snímačů vibrací a také zpracování a analýza signálu.

Na popis vibrační diagnostiky navazuje kapitola věnující se on-line monitorovacím systémům, což jsou prostředky technické diagnostiky trvale připojené k diagnostikovanému objektu a jsou určeny pro diagnostikování a vyhodnocování při provozu. Umožňují sledovat technický stav objektu průběžně nebo v pravidelných intervalech. Hlavními výhodami monitorovacích systémů jsou okamžité rozpoznání náhlého zhoršení kontrolovaných parametrů a provedení předem zvolených úkonů po přesažení definovaných mezí, například spuštění varovné signalizace, odeslání varovného hlášení, nebo přerušení chodu stroje, dále možnost zálohování velkého množství dat a zpětného vyhledávání v těchto datech (například pro zjištění při jakých podmínkách byl vyroben určitý výrobek), případně jejich analyzování. V rámci páté kapitoly této diplomové práce jsou popsáni a porovnání vybraní zástupci on-line monitorovacích systémů výrobců ADASH, ifm electronic, SKF a 4dot. Monitorovací systém Chipmunk od firmy 4dot měl být podle původního plánu použit při měření praktické části této práce, proto je část této kapitoly věnována popisu diagnostického systému 4dot. Z důvodu složité celosvětové situace, která nastala v době měření, nebylo možné provést měření monitorovací jednotkou Chipmunk od firmy 4dot, i když bylo pro měření všechno připravené. Pro ukázkou funkčnosti monitorovací jednotky Chipmunk je v příloze 1 zobrazeno příkladové měření pomocí této monitorovací jednotky včetně popisu provedeného měření.

V šesté kapitole jsou popsány teoretické základy frézování včetně základních vzorců výpočtu řezných podmínek. Dále jsou v této kapitole popsána kmitání, která se mohou vyskytovat při obrábění. Kmitání jednotlivých prvků obráběcího systému, který je tvořen obráběcím strojem, nástrojem a obrobkem, negativně ovlivňuje kvalitu obrobenej plochy, intenzitu opotřebení nástroje, nebo například opotřebení jednotlivých součástí obráběcího stroje.

Následující kapitola se zabývá popisem provedeného měření a všech částí potřebných k provedení tohoto měření, tedy obráběcího stroje a měřicí aparatury včetně popisu umístění senzorů. Na závěr této kapitoly je popsán způsob vyhodnocení kvality povrchu testovacích vzorků.

Na kapitolu zabývající se popisem měření navazuje vyhodnocení provedených měření. Vyhodnocení je možné rozdělit na dvě části, první částí je vyhodnocení měření vibrací, druhou částí je vyhodnocení měření kvality povrchu. Vyhodnocení vibrací bylo zaměřeno na vibrace v osách x a y, jejichž hodnoty jsou oproti hodnotám vibrací v ose z výraznější, a tedy pro vyhodnocení tohoto experimentálního měření významnější. Byla porovnána energie frekvenčních spekter vibrací získaných při měření během jednotlivých operací obrábění obou obrobků. Energie frekvenčních spekter vibrací byla vyhodnocována ve čtyřech frekvenčních pásmech, která byla zvolena tak, aby rovnoměrně pokryla frekvenční rozsah vyhodnocovaných spekter vibrací.

Porovnání kvality povrchu testovacích vzorků bylo provedeno pomocí vybraných profilových a plošných parametrů drsnosti povrchu.

Poslední kapitola je věnována zhodnocení výsledků získaných při měření vibrací a kvality povrchu. Na závěr této kapitoly jsou shrnuty dosažené výsledky včetně návrhů na zlepšení a navázání na tuto práci.

Jedním z cílů této diplomové práce bylo vytvořit dokumentaci k použitému systému. Kvůli svému rozsahu je tato dokumentace zobrazena v příloze 3.

Vyhodnocení naměřených vibrací potvrdilo očekávání, že při obrábění neideálními řeznými podmínkami budou naměřeny vyšší vibrace než při obrábění ideálními řeznými podmínkami. Toto očekávání potvrdily oba způsoby měření, tedy měření třemi jednoosými akcelerometry připojenými k monitorovací jednotce SKF Multilog IMx-8 i trojosým akcelerometrem připojeným k měřicí kartě NI 9234. V předkládané diplomové práci se tedy podařilo prokázat, že je možné pomocí monitorování vibrací při obrábění sledovat odchylky použitých podmínek obrábění od těch ideálních, případně další změny procesu obrábění, které se projeví změnou vibrací. Očekávaný vliv vyšších vibrací na kvalitu povrchu se nepotvrdil a z dosažených výsledků je zřejmé, že oba obrobky obráběné různými řeznými podmínkami mají minimální rozdíly v kvalitě povrchu. Odlišnost řezných podmínek obrábění byla dostatečná na projevení se ve velikosti naměřených vibrací, nebyla však dostatečná pro projevení se v kvalitě povrchu obrobků. Výsledky této diplomové práce je možné využít jako základ pro další měření, například sérii měření vibrací při obrábění odlišnými řeznými podmínkami, kdy by řezné podmínky byly postupně upravovány tak, až by došlo k výraznějšímu projevení vibrací v kvalitě povrchu obrobků.

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN 13306. *Údržba - Terminologie údržby*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 60 s. Třídící znak 01 0660.
- [2] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [3] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. Praha: Professional Publishing, 2013. ISBN 978-80-7431-119-2.
- [4] ZEZULKA, František, Ivo VESELÝ a Vlastimil BRAUN. *Úvod do problematiky a základní modely Industry 4.0* [online]. 2017 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.systemonline.cz/rizeni-vyroby/uvod-do-problematiky-a-zakladni-modely-in-dustry-4.0.htm>
- [5] MELANSON, Tony. What Industry 4.0 Means for Manufacturers. In: *Aethon: Autonomous Mobile Robots and Tracking Solutions* [online]. Pittsburgh: Aethon, 2017 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://aethon.com/mobile-robots-and-industry4-0/>
- [6] SZYDŁOWSKÁ, Alena. *Nová průmyslová revoluce - Průmysl 4.0* [online]. 2017 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://www.datamix.eu/blog/nova-prumyslova-revoluce-prumysl-4-0/>
- [7] FUSKO, Miroslav. *Údržba v Priemysle 4.0* [online]. b.r. [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/285766093_Udrzba_v_Priemysle_40
- [8] VDOLEČEK, František. *Technická diagnostika v systémech údržby* [online]. 2008 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/37313.pdf
- [9] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [10] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [11] BLATA, Jan a Janusz JURASZEK. *Metody technické diagnostiky: teorie a praxe = Metody diagnostyki technicznej : teorie a praktyka*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-2997-5.
- [12] ČSN ISO 2041. *Vibrace, rázy a monitorování stavu - Slovník*. 3. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [13] BROCH, J.T. *Mechanical Vibration and Shock Measurements*. 2. vyd. Naerum: Brüel & Kjaer, 1984, 370 s. ISBN 8787355361.
- [14] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice* [online]. 2010 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [15] STODOLA, Jiří, Alena BREZNICKÁ a Pavel NOVOTNÝ. *Vibrodiagnostika strojů: monografie*. Brno: MSD, 2017, 112 s. ISBN 978-80-7392-276-4.

- [16] KARBAN, Pavel. *KTE/TEVS - Rychlá Fourierova transformace* [online]. 2011 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12_prednaska.pdf
- [17] BOČEK, Petr a Jan ZATLOUKAL. *Prvky pro prediktivní údržbu strojů* [online]. 2014 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52405.pdf
- [18] ZATLOUKAL, Jan a Lukáš HEISIG. *On-line vibrační diagnostika obráběcích strojů* [online]. 2013 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10619.pdf
- [19] Uživatelský manuál A3900-II. *Adash* [online]. © 2017 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://adash.com/documents/A3900/Adash-A3900-manual-cz.pdf>
- [20] Informační list A3800. *Adash* [online]. © 2018 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://adash.com/documents/A3800/Adash-A3800-informacni-list.pdf>
- [21] A3800 – on-line monitorovací systém. *Adash* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/online-merici-systemy/a3800>
- [22] Informační list A3716. *Adash* [online]. © 2016 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://adash.com/documents/A3716/Adash-A3716-informacni-list.pdf>
- [23] Uživatelský manuál A3716, A3800. *Adash* [online]. © 2019 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://adash.com/documents/A3800/A3716_A3800_man_cz.pdf
- [24] A3716 – on-line monitorovací systém. *Adash* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://adash.com/cs/online-merici-systemy/a3716>
- [25] Flexible data logger for vibration and process values. *Ifm electronic* [online]. © 2015 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/binaries/content/assets/pdf-files/en/product-news/2015/ifm-vse002-diagnostic-electronics-15-gb.pdf>
- [26] Systémy pro monitorování vibrací a diagnostiku. *Ifm electronic* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://www.ifm.com/cz/cs/category/070/070_010
- [27] Online condition monitoring with fieldbus interface. *Ifm electronic* [online]. © 2017 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/binaries/content/assets/pdf-files/en/product-news/2017/sps/ifm-vse150-online-condition-monitoring-with-fieldbus-interface-en-17-18.pdf>
- [28] VSE151. *Ifm electronic* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.ifm.com/cz/cs/product/VSE151?tab=details>
- [29] Systémy pro monitorování vibrací a diagnostiku – Diagnostická elektronika. *Ifm electronic* [online]. © 2020 [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://www.ifm.com/cz/cs/category/070/070_010/070_010_015#!/S/BD/DM/1/D/0/F/0/T/24
- [30] SKF Multilog On-line System IMx-C. *SKF Group* [online]. © 2013 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d19680208b05-CM-P8-12959-1-EN-SKF-Multilog-IMx-C-data-sheet_tcm_12-244977.pdf#cid-244977
- [31] SKF Multilog On-line System IMx-S. *SKF Group* [online]. © 2014 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.skf.com/binary/57-293117/0901d1968060138a-PUB-CM-P8-10407-5b-EN-SKF-Multilog-OLS-IMx-S-brochure.pdf>

- [32] SKF Multilog On-line System IMx-W. *SKF Group* [online]. © 2013 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <https://www.skf.com/binary/151-21458/0901d196800db09a-CM-P8-10674-2-EN-SKF-Multilog-IMx-W-data-sheet.pdf>
- [33] SKF Multilog On-line System IMx-8. *SKF Group* [online]. © 2017 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: https://www.skf.com/binary/tcm:54-295983/0901d1968063a4d8-SKF-Multilog-On-line-System-IMx-8---17174-CS_tcm_54-295983.pdf
- [34] SKF Multilog On-line System IMx-8 User manual. *SKF Group* [online]. © 2017 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://www.skf.com/binary/tcm:12-289998/IMx-8%20User%20Manual_EN%2015V_090_00049_100_tcm_12-289998.pdf
- [35] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. 2003 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK_STR3/um/TI_TO-1cast.pdf
- [36] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [37] *Návod k používání vertikálního obráběcího centra MCV 754 Quick*. 4.01. KOVOSVIT MAS, a.s., Sezimovo Ústí, 2012.
- [38] MCV 754 Quick. *KOVOSVIT MAS* [online]. © 2016 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html#main>
- [39] CTC Accelerometer Overview. *Connection Technology Center* [online]. © 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.ctconline.com/epicor/Accelerometer_Overview.pdf
- [40] AC244 Datasheet. *Connection Technology Center* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://documents.ctconline.com/datasheet?type=Sensor&prd=AC244>
- [41] PCB Model 356B18. *PCB Piezotronics* [online]. © 2020 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/products?model=356b18>
- [42] NI 9234 Datasheet. *National Instruments* [online]. © 2015 [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf
- [43] *Interní materiály metrologie ÚVSSR FSI VUT v Brně*.
- [44] JANKOVÝCH, Róbert. *Studijní materiály a přednášky z předmětu Praktická metrologie (XPT)* [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/course/view.php?id=213965>
- [45] PCB Model 602D01. *PCB Piezotronics* [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.pcb.com/products?model=602D01>

12 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

12.1 Seznam tabulek

Tab 1)	Technická specifikace monitorovacích systémů. [21, 28, 34].....	40
Tab 2)	Základní technické parametry obráběcího centra MCV 754 Quick. [37]	46
Tab 3)	Základní technické parametry akcelerometru AC244-1D. [40]	47
Tab 4)	Základní technické parametry akcelerometru 356B18. [41]	47
Tab 5)	Řezné podmínky obrábění.	49
Tab 6)	Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, čelní frézování).	57
Tab 7)	Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, čelní frézování).	58
Tab 8)	Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, frézování hran).	60
Tab 9)	Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, frézování hran).	61
Tab 10)	Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, frézování obd. kapsy).	62
Tab 11)	Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, frézování obd. kapsy).	64
Tab 12)	Energie frekvenčních spekter vibrací (Multilog IMx-8, frézování kruhové kapsy).	66
Tab 13)	Energie frekvenčních spekter vibrací (NI 9234, frézování kruhové kapsy).	67
Tab 14)	Parametry drsnosti povrchu (měření 1).	68
Tab 15)	Parametry drsnosti povrchu (měření 2).	69
Tab 16)	Parametry drsnosti povrchu (měření 3).	70
Tab 17)	Parametry drsnosti povrchu (měření 4).	71

12.2 Seznam obrázků

Obr. 1)	Typy údržby. [1]	17
Obr. 2)	Vývoj průmyslových generací. [6]	18
Obr. 3)	Vanová křivka průběhu opotřebení. [11]	20
Obr. 4)	Harmonické kmitání s vyznačením maximální amplitudy, střední kvadratické a absolutní hodnoty. [10]	22
Obr. 5)	Neharmonický periodický pohyb. [10]	23
Obr. 6)	Volné kmitání vyvolané impulsní budící silou. [2]	23
Obr. 7)	Náhodné kmitání. [10]	24
Obr. 8)	Vztah mezi výchylkou, rychlostí a zrychlením. [2]	24
Obr. 9)	Omezení použití měřících veličin. [2]	25
Obr. 10)	Snímač zrychlení. [2]	26

Obr. 11) Konstrukční uspořádání piezoelektrických akcelerometrů: a) Delta Shear [®] , b) Planar Shear, c) s centrálním tlakovým namáháním (B – těleso snímače, m – seismická hmota, P – piezoelektrický prvek, R – předpínací prstenec, S – předpínací disk). [14]	27
Obr. 12) Vliv způsobů přichycení snímače na amplitudovou frekvenční charakteristiku. [14]	28
Obr. 13) Princip frekvenční analýzy vibračního signálu. [2].....	30
Obr. 14) Princip chyby typu aliasing. [2]	31
Obr. 15) Modul A3900-II. [19].....	33
Obr. 16) On-line monitorovací systém A3800. [21].....	34
Obr. 17) On-line monitorovací systém A3716: a) A3716-2U, b) A3716-3U. [23]	35
Obr. 18) Vyhodnocovací jednotky VSE100 (vlevo) a VSE002 (vpravo). [26].....	35
Obr. 19) Vyhodnocovací jednotka VSE150. [27].....	36
Obr. 20) SKF Multilog IMx-S 16 (vlevo) a SKF Multilog IMx-S 32 (vpravo). [31]....	37
Obr. 21) On-line systém SKF Multilog IMx-8. [33]	38
Obr. 22) Skříňka s krytím IP65. [33]	38
Obr. 23) Monitorovací jednotka Chipmunk.	38
Obr. 24) Blokové schéma diagnostického systému 4dot.	39
Obr. 25) MCV 754 Quick. [38]	45
Obr. 26) Piezoelektrický akcelerometr AC244-1D od firmy CTC. [40]	46
Obr. 27) Piezoelektrický akcelerometr 356B18 od firmy PCB Piezotronics. [41].....	47
Obr. 28) Analogová měřicí karta NI 9234. [42]	48
Obr. 29) Přichycené akcelerometry k hliníkové objímce (vlevo) a připevňená objímka na vřetenu včetně akcelerometrů a kabeláže (vpravo). Převzato od vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Zutha, Ph.D.	48
Obr. 30) Testovací vzorek. Převzato od vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Zutha, Ph.D.	49
Obr. 31) Taylor Hobson Talysurf CCI Lite. Převzato od vedoucího diplomové práce Ing. Daniela Zutha, Ph.D.	50
Obr. 32) Označení míst měření textury povrchu obrobků.	51
Obr. 33) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, chod naprázdno) s vyznačenými frekvenční pásmy.	55
Obr. 34) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, čelní frézování, obrobek 1).	56
Obr. 35) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, čelní frézování, obrobek 2).	56
Obr. 36) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, čelní frézování, obrobek 1).	57
Obr. 37) Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, čelní frézování, obrobek 2).	57
Obr. 38) Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při čelním frézování.	58
Obr. 39) Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování hran, obrobek 1).	59

Obr. 40)	Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování hran, obrobek 2).	59
Obr. 41)	Frekvenční spektrum vibrací (NI 9234, frézování hran, obrobek 1).	60
Obr. 42)	Frekvenční spektrum vibrací (NI 9234, frézování hran, obrobek 2)	60
Obr. 43)	Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při frézování hran.....	61
Obr. 44)	Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování obd. kapsy, obrobek 1). 62	
Obr. 45)	Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování obd. kapsy, obrobek 2). 62	
Obr. 46)	Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování obd. kapsy, obrobek 1).	63
Obr. 47)	Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování obd. kapsy, obrobek 2).	63
Obr. 48)	Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při frézování obd. kapsy.	64
Obr. 49)	Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování kr. kapsy, obrobek 1). ..	65
Obr. 50)	Frekvenční spektra vibrací (Multilog IMx-8, frézování kr. kapsy, obrobek 2). ..	65
Obr. 51)	Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování kruhové kapsy, obrobek 1). ..	66
Obr. 52)	Frekvenční spektra vibrací (NI 9234, frézování kruhové kapsy, obrobek 2). ..	66
Obr. 53)	Porovnání energií frekvenčních spekter vibrací při obrábění kruhové kapsy. ..	67
Obr. 54)	Snímek povrchu (měření 1): a) obrobek 1, b) obrobek 2.	68
Obr. 55)	Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 1).	68
Obr. 56)	Snímek povrchu (měření 2): a) obrobek 1, b) obrobek 2.	69
Obr. 57)	Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 2).	69
Obr. 58)	Snímek povrchu (měření 3): a) obrobek 1, b) obrobek 2.	70
Obr. 59)	Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 3).	70
Obr. 60)	Snímek povrchu (měření 4): a) obrobek 1, b) obrobek 2.	71
Obr. 61)	Porovnání parametrů drsnosti povrchu (měření 4).	71

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Příkladové měření pomocí monitorovací jednotky Chipmunk
Příloha 2	Výrobní výkres testovacího vzorku
Příloha 3	Interní webová aplikace 4dot a ukázka databáze
Příloha 4	Webová aplikace IDA

PŘÍLOHY

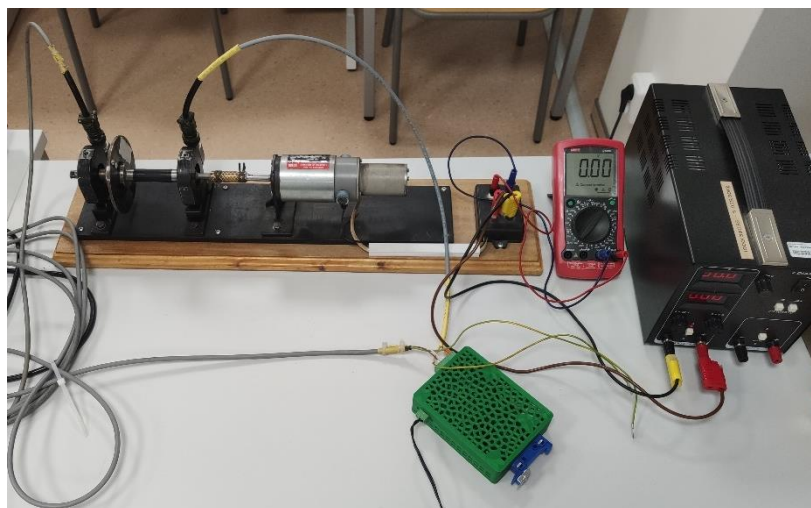
Příloha 1 – Příkladové měření pomocí monitorovací jednotky Chipmunk

Jako příkladové měření bylo provedeno měření zrychlení vibrací na dvou stojanech ložisek diagnostického stroje, u kterého byla simulována nevyváženost pomocí závaží v rotačním disku.

Měření bylo provedeno pomocí monitorovací jednotky Chipmunk, ke které byly připojeny dva jednoosé akcelerometry. Byly použity akcelerometry s označením 602D01 od společnosti PCB Piezotronics. Jedná se o piezoelektrické akcelerometry smykového typu. Základní technické parametry těchto akcelerometrů jsou uvedeny v tabulce níže. Senzory byly uchyceny ke stojanům ložisek šroubovým spojením. [45]

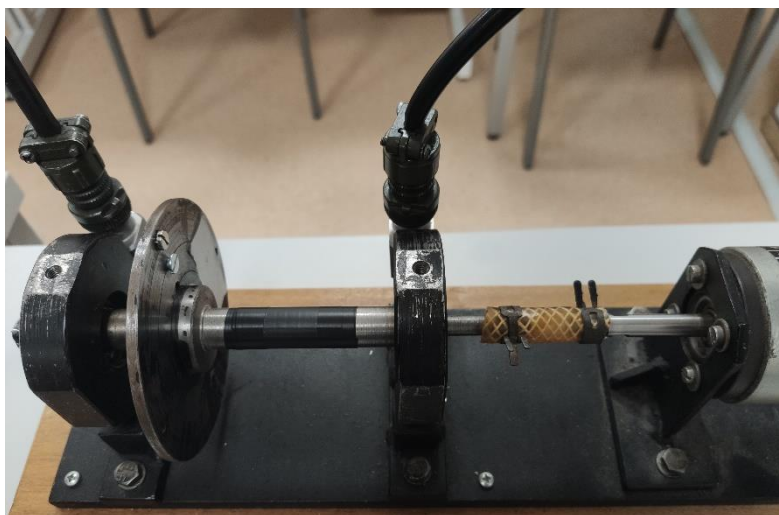
Základní technické parametry akcelerometru 602D01. [45]

Citlivost ($\pm 10\%$)	100	mV/g
Frekvenční rozsah (± 3 dB)	0,5 až 8000	Hz
Dynamický rozsah	± 50	g
Rezonanční frekvence	25000	Hz
Teplotní rozsah	-54 až 121	$^{\circ}\text{C}$
Hmotnost	74	gramů



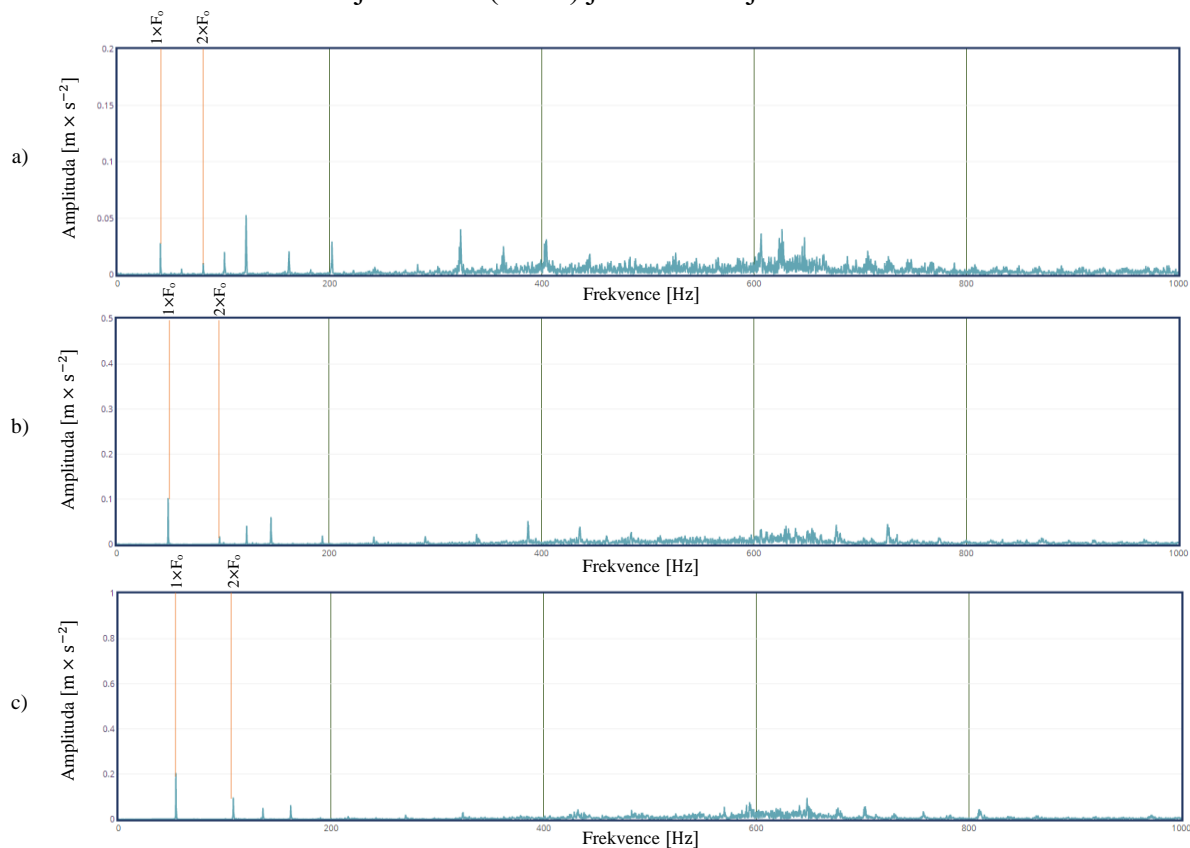
Diagnostický stroj včetně akcelerometrů a monitorovací jednotky Chipmunk.

Byla provedena tři měření při různých otáčkách bez přidaného závaží na rotačním disku. Následně bylo přidáno závaží na rotační disk (2 šrouby) a opět provedena 3 měření při otáčkách shodných s těmi při měření bez přidaného závaží.

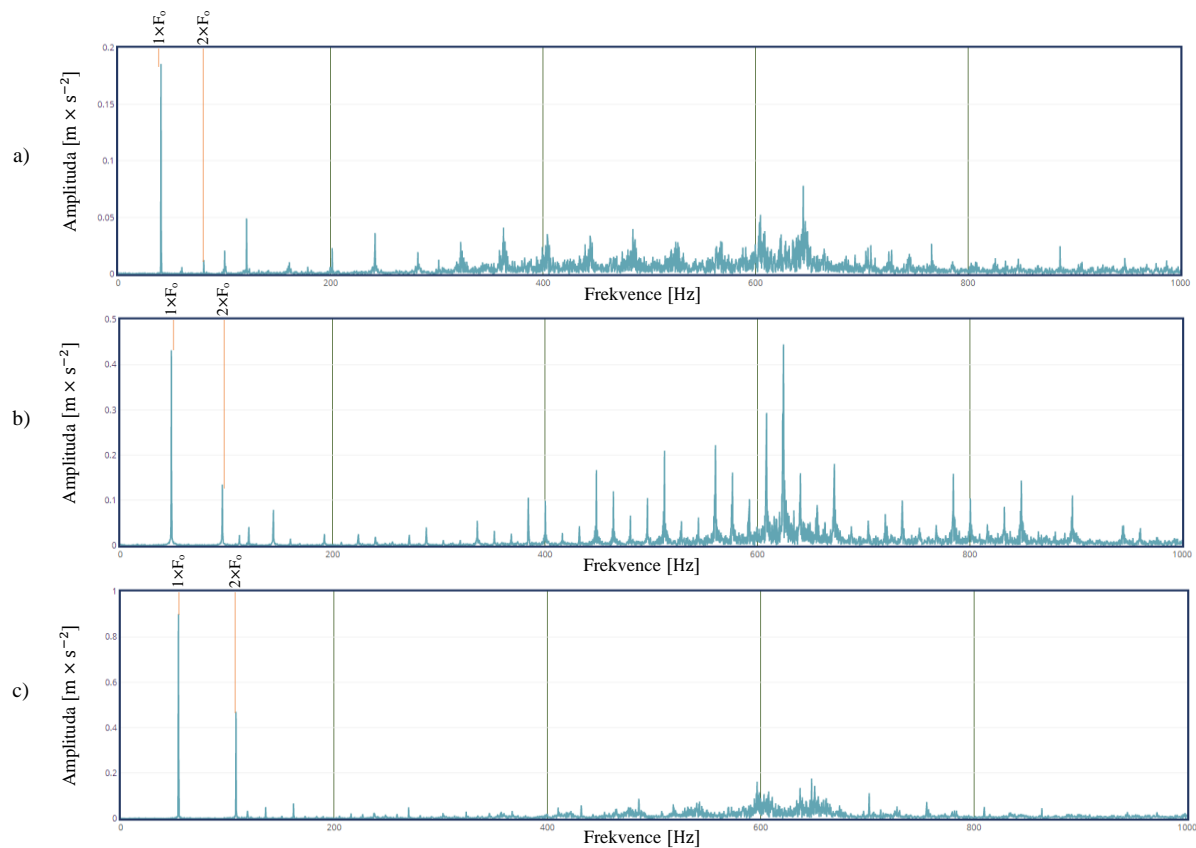


Detailní zobrazení umístění akcelerometrů a přidaného závaží v rotačním disku.

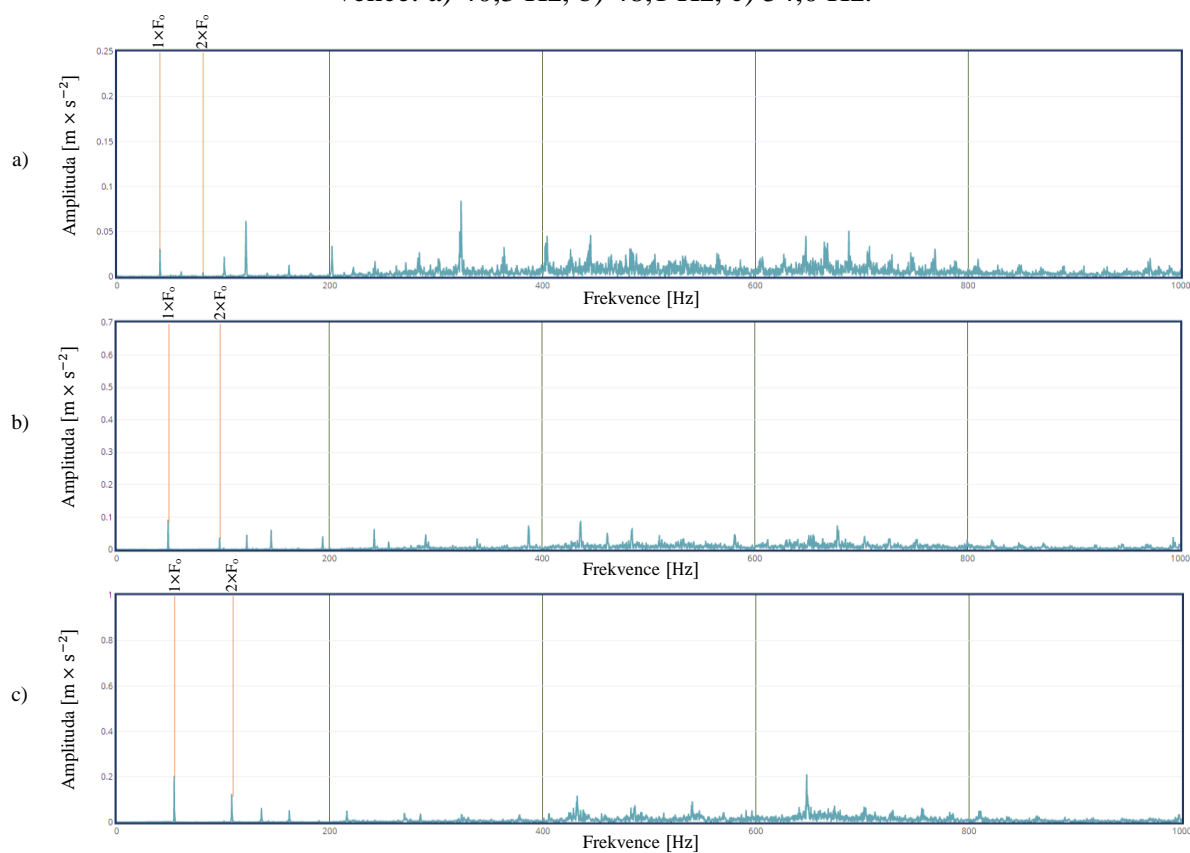
Níže jsou zobrazena frekvenční spektra vibrací získaná při jednotlivých měřeních. Ve frekvenčních spektrech vibrací jsou zvýrazněny základní otáčková frekvence ($1 \times F_0$) a její harmonický násobek ($2 \times F_0$). Otáčky jednotlivých měření jsou uvedeny v označeních jednotlivých spekter. Ložisko umístěné blíže zdroji otáčení (vpravo) je označeno jako ložisko A. Ložisko umístěné dále od zdroje otáčení (vlevo) je označeno jako ložisko B.



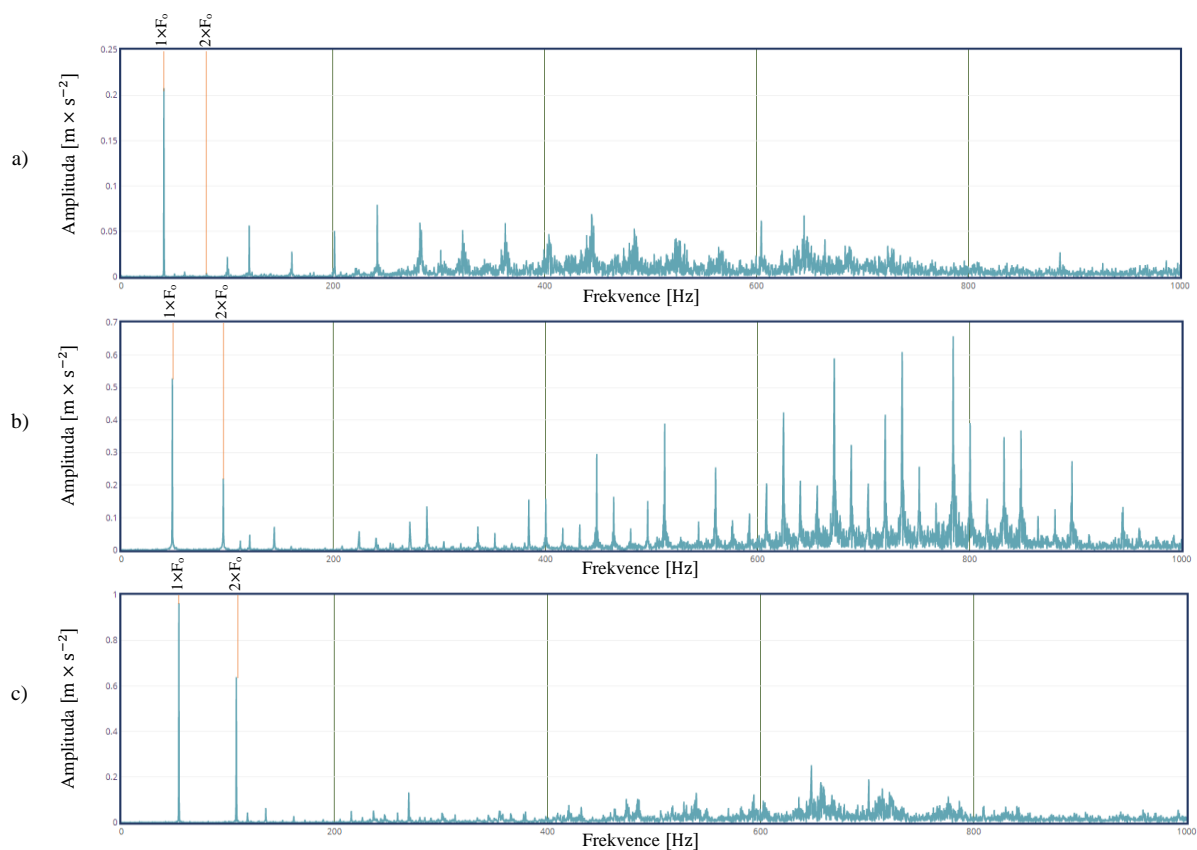
Frekvenční spektra vibrací, ložisko A, měření bez přidaného závaží, otáčková frekvence: a) 40,4 Hz, b) 48,4 Hz, c) 54,0 Hz.



Frekvenční spektra vibrací, ložisko A, měření s přidaným závažím, otáčková frekvence: a) 40,3 Hz, b) 48,1 Hz, c) 54,0 Hz.



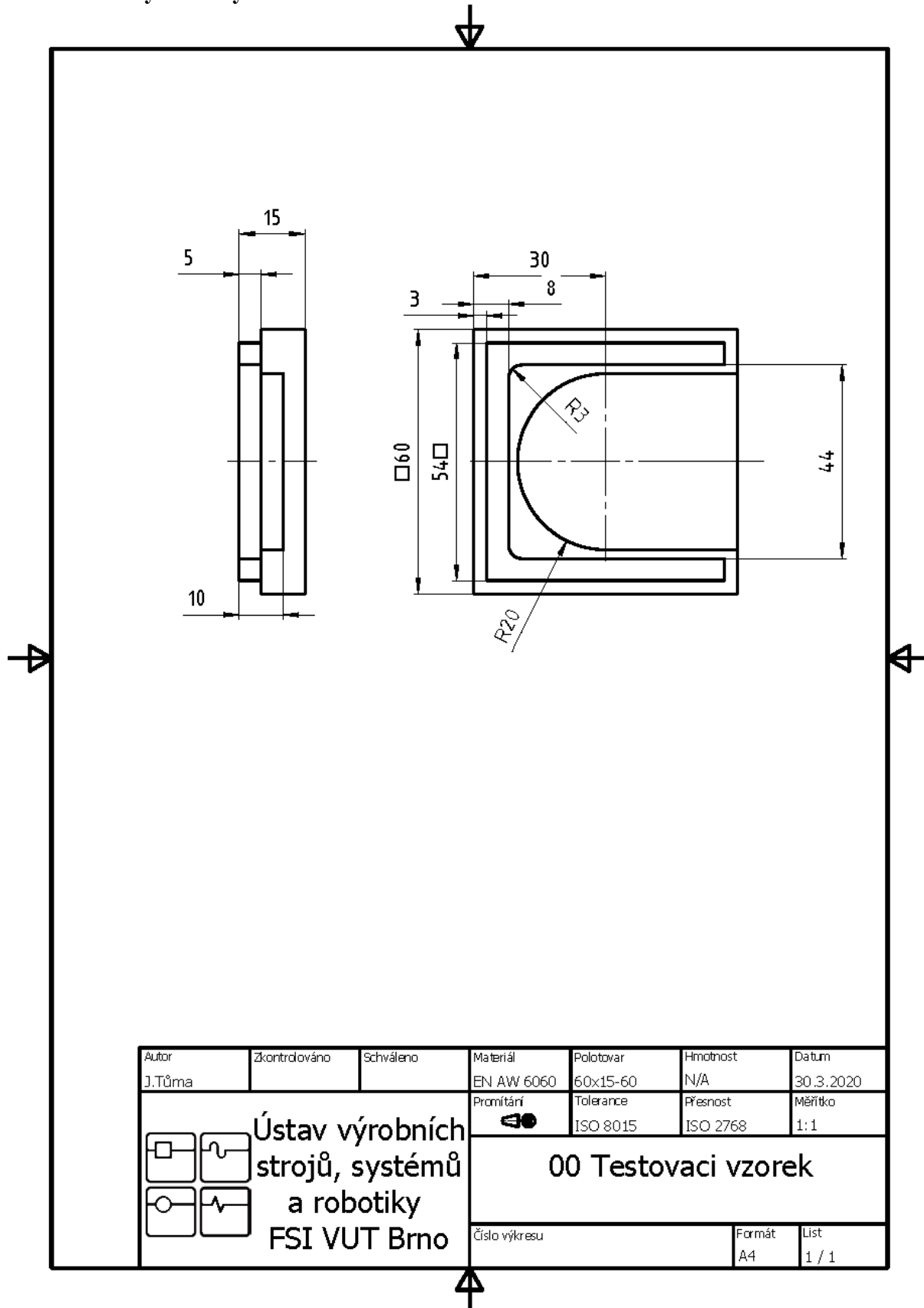
Frekvenční spektra vibrací, ložisko B, měření bez přidaného závaží, otáčková frekvence: a) 40,4 Hz, b) 48,4 Hz, c) 54,0 Hz.



Frekvenční spektra vibrací, ložisko B, měření s přidaným závažím, otáčková frekvence: a) 40,3 Hz, b) 48,1 Hz, c) 54,0 Hz.

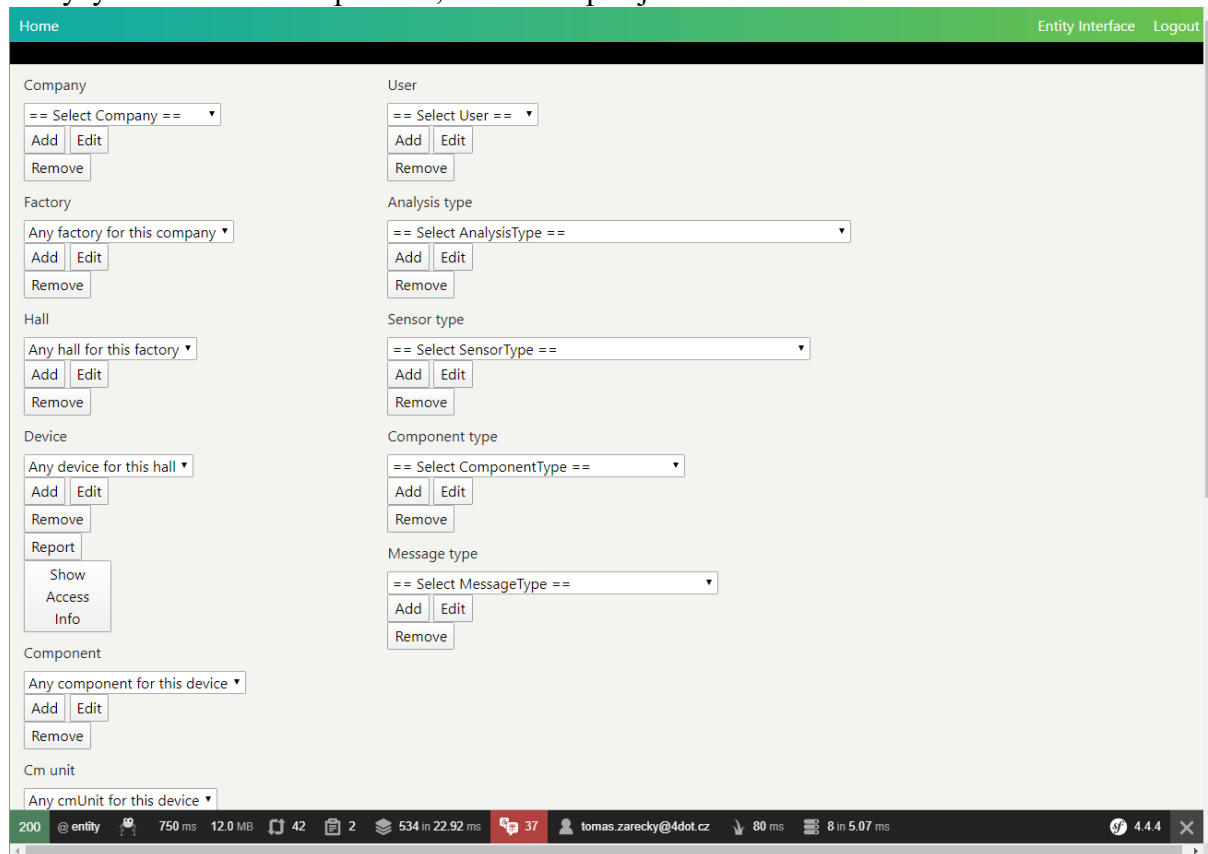
Zobrazená frekvenční spektra vibrací potvrzují předpoklad vyšších vibrací při měření s přidaným závažím, a také vyšší vibrace naměřená na stojanu ložiska vzdálenějšího od zdroje otáčení, tedy na ložisku B.

Příloha 2 – Výrobní výkres testovacího vzorku

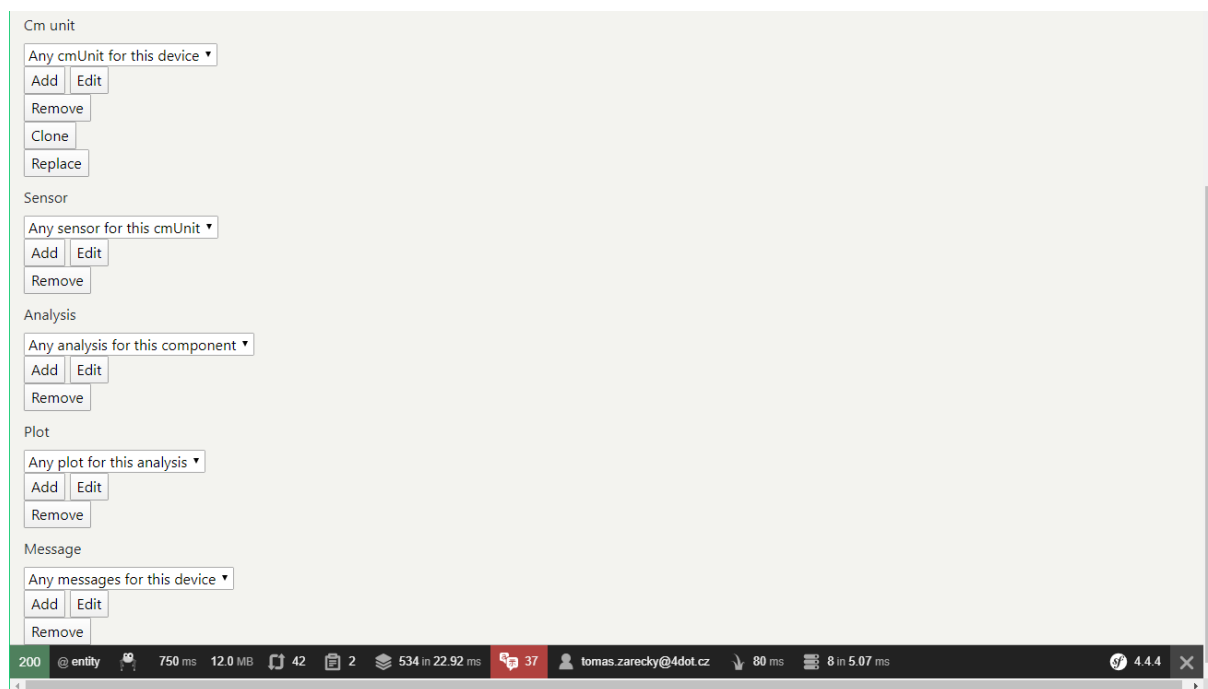


Příloha 3 – Interní webová aplikace 4dot a ukázka databáze

Interní webovou aplikaci 4dot je možné rozdělit na dvě části. Do první části aplikace je možné se přesunout pomocí tlačítka Entity Interface v pravé horní části kterékoliv obrazovky aplikace. V této části je možné přidávat, upravovat, nebo odstraňovat společnosti, zařízení, komponenty, analýzy a mnoho dalších položek, které se zapisují do databáze.



Obrazovka nastavení (část 1).



Obrazovka nastavení (část 2).

Jednotlivé položky jsou na sobě závislé, například před vytvořením nového zařízení je nutné nejdříve vytvořit společnost, továrnu a halu, nebo vybrat některou z již vytvořených.

Výběr společnosti, továrny a haly před vytvořením zařízení.

Zařízení se následně vytvoří pomocí tlačítka Add u položky Device. Ostatní položky se vytváří stejným způsobem, liší se pouze informacemi, které je zapotřebí vyplnit. Vytvoření je třeba potvrdit tlačítkem Save.

Vytvoření zařízení.

Po vytvoření položky v interní aplikaci 4dot se položka vytvoří v databázi. Každá položka má své unikátní identifikační číslo.

<input type="checkbox"/> Změnit	id	hall_id	name	producer	state	manual	type	subtype
<input type="checkbox"/> upravit	43	21	MCV 754 Quick	Kovosvit MAS	15	NULL	NULL	NULL

Ukázka vytvořeného zařízení v databázi.

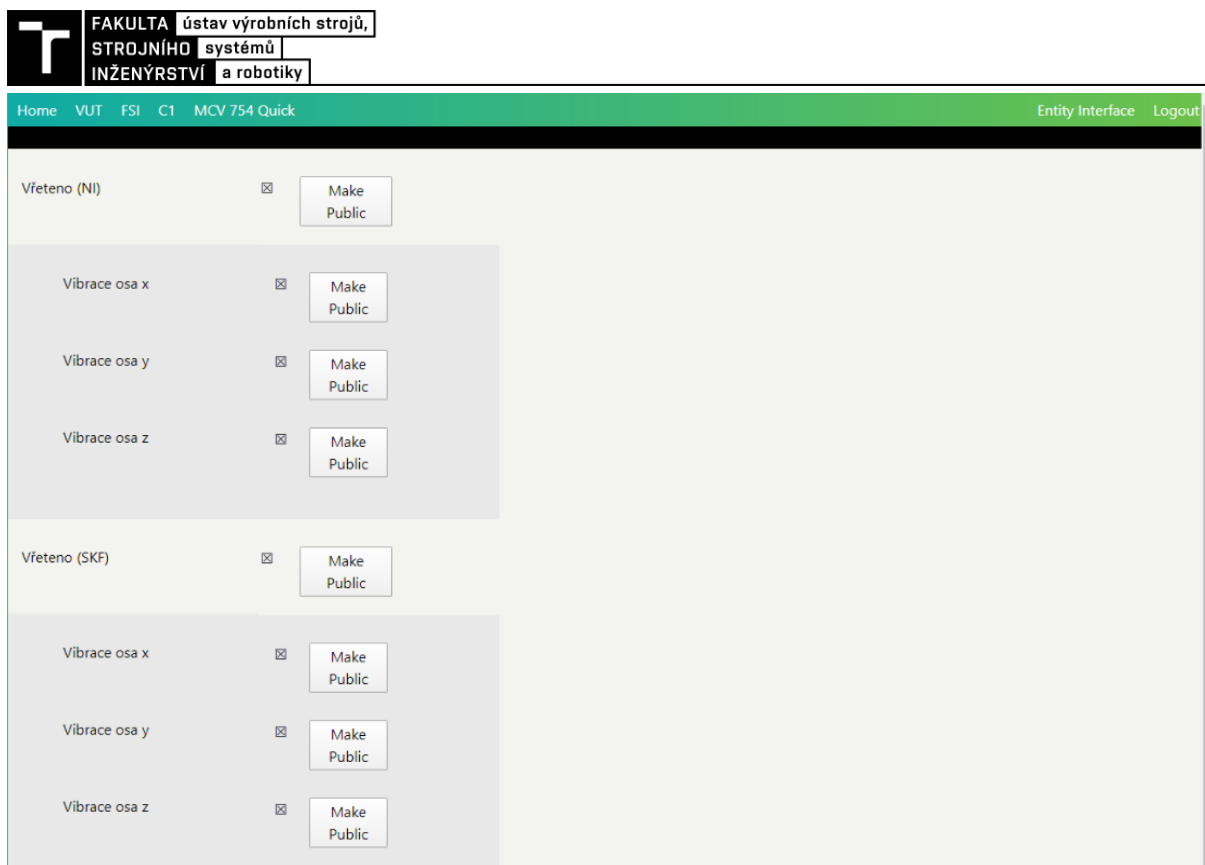
Při přidávání analýzy je nejdříve zapotřebí z rozbalovacího seznamu vybrat požadovanou analýzu a potvrdit její výběr tlačítkem Set Analysis. Po potvrzení vybrané analýzy se doplní požadované informace a přidání analýzy se potvrdí tlačítkem Save. Analýza nazvaná aRMS označuje efektivní hodnotu zrychlení.

Potvrzení vybrané analýzy.

Přidání analýzy.

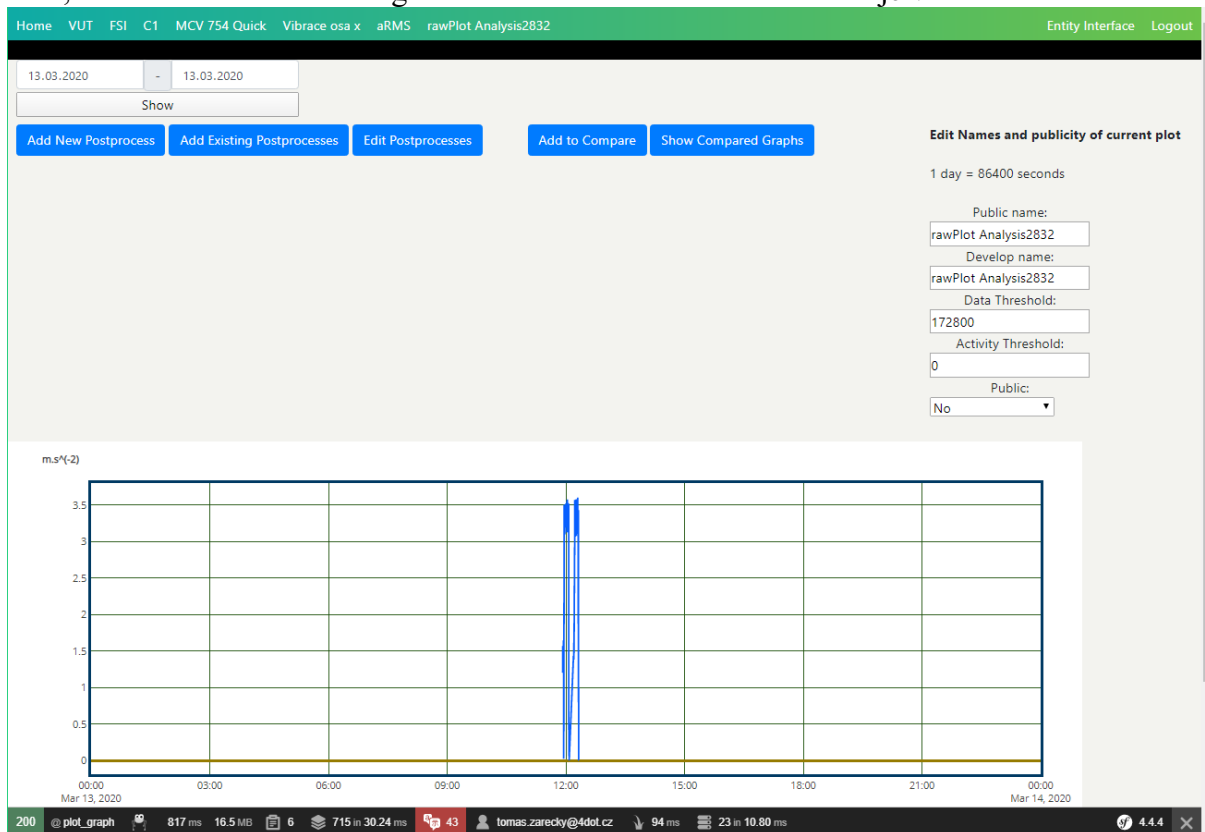
Po vytvoření všech potřebných položek a přidání požadovaných analýz je možné se přesunout do druhé části interní aplikace 4dot pomocí v levém horním rohu nacházejícího se tlačítka Home, které uživatele přesměruje na obrazovku výběru společnosti. Postupně je zapotřebí vybrat společnost, továrnu, halu, zařízení, komponentu, analýzu a graf. Zvolené položky jsou vždy vypsány v horní liště obrazovky. Je možné se vracet na výběr kterékoliv úrovně pomocí kliknutí na vybranou položku v horní liště.

Výběr zařízení.



Výběr komponenty a osy měření vibrací.

Po výběru všech položek (společnosti, továrny, haly, zařízení, komponenty, analýzy a grafu) je možné na obrazovce zobrazení grafu přidávat a upravovat postprocesy, graf přidávat do porovnání, nebo měnit informace o grafu. Zobrazované období se nastavuje v levé horní části.



Obrazovka zobrazení grafu.

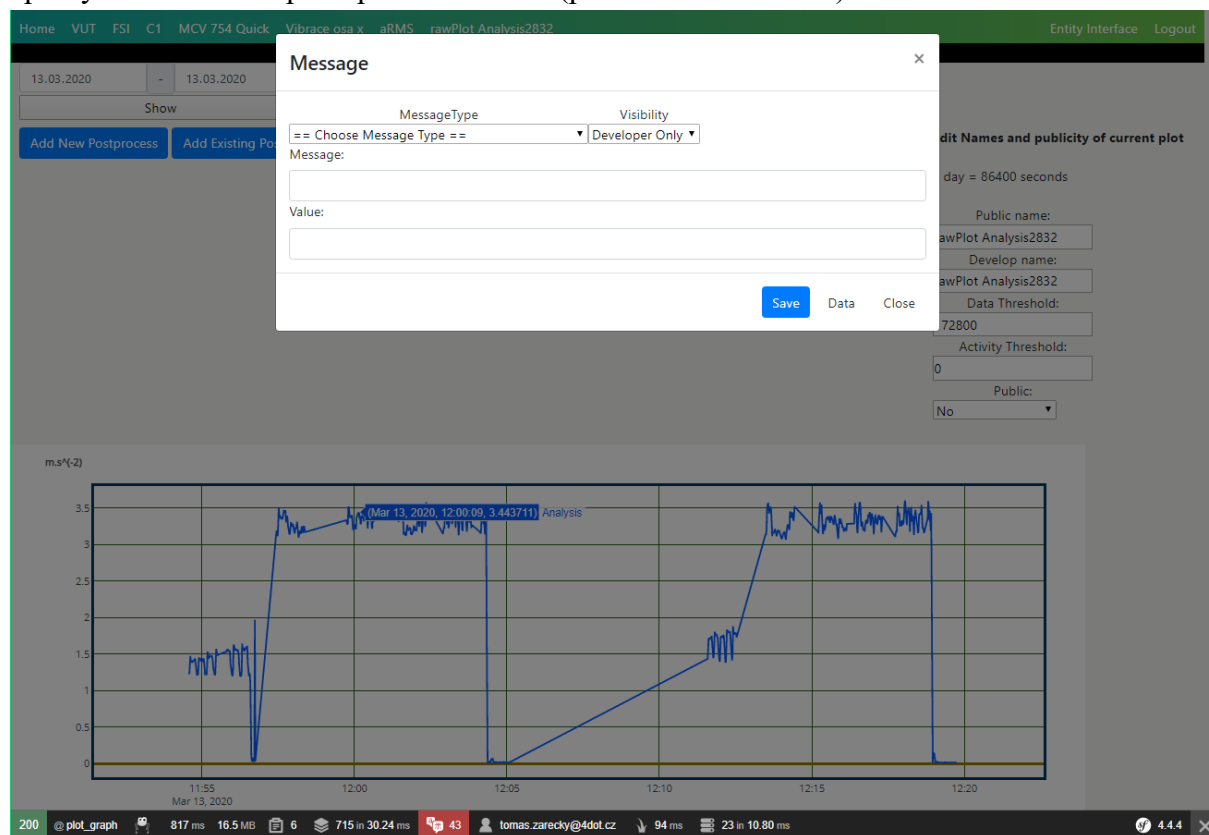
S grafy je možné pracovat pomocí několika funkcí. Ikony těchto funkcí se zobrazí vpravo nad grafem po najetí kurzoru na graf.



Ikony funkcí pro práci s grafem.

- 1 – Přiblížení vybraného pole.
- 2 – Posunutí grafu.
- 3 – Přiblížení celého grafu.
- 4 – Oddálení celého grafu.
- 5 – Automatické zvolení měřítka os.
- 6 – Navrácení měřítka os do výchozího stavu.
- 7 – Zapnutí/vypnutí pomocných čar zobrazených při najetí kurzoru na určitý bod grafu.
- 8 – Zapnutí zobrazení času a hodnoty u kurzoru po najetí kurzoru na určitý bod grafu.
- 9 – Zapnutí zobrazení času na časové ose a hodnoty u kurzoru po najetí kurzoru na určitý bod grafu.
- 10 – Stažení grafu ve formátu png s rozlišením 1000×500.

Kliknutím na libovolný bod grafu se zobrazí nabídka, pomocí které je možné přidávat různé zprávy nebo zobrazit předzpracovaná data (pomocí tlačítka Data).

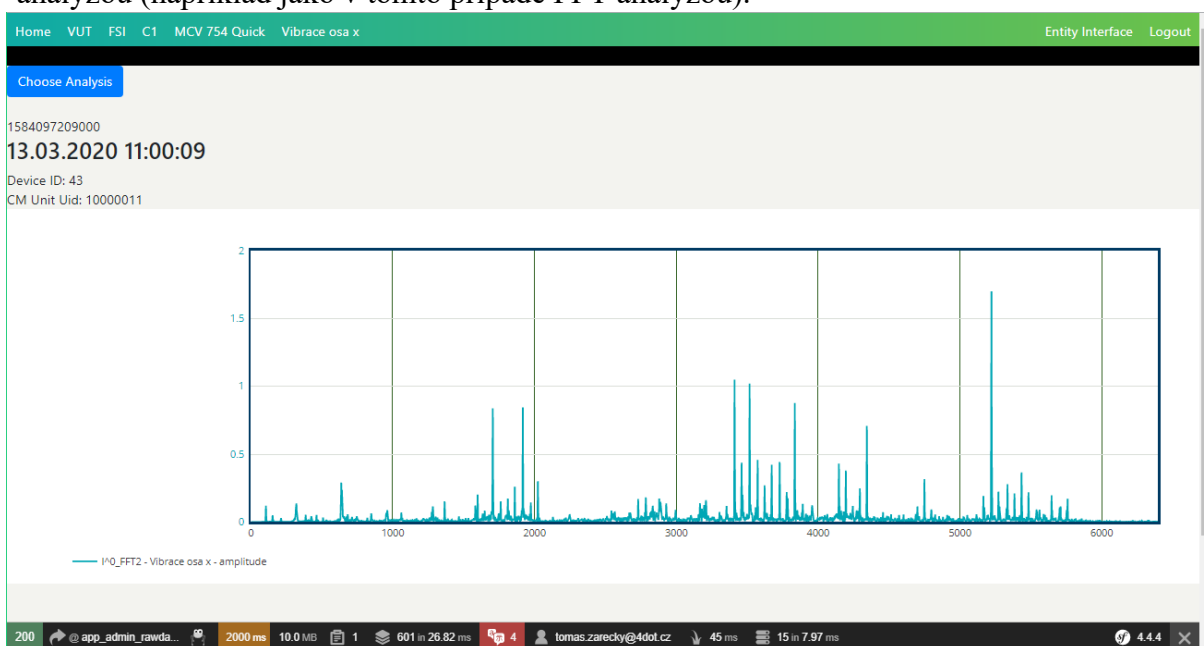


Nabídka přidávání zprávy a zobrazení dat.



Zobrazení předzpracovaných dat.

Pomocí tlačítka Choose Analysis je možné vybrat jinou již přidanou analýzu u této komponenty a zobrazit předzpracovaná data pro tuto analýzu, případně zobrazit data zpracovaná určitou analýzou (například jako v tomto případě FFT analýzou).

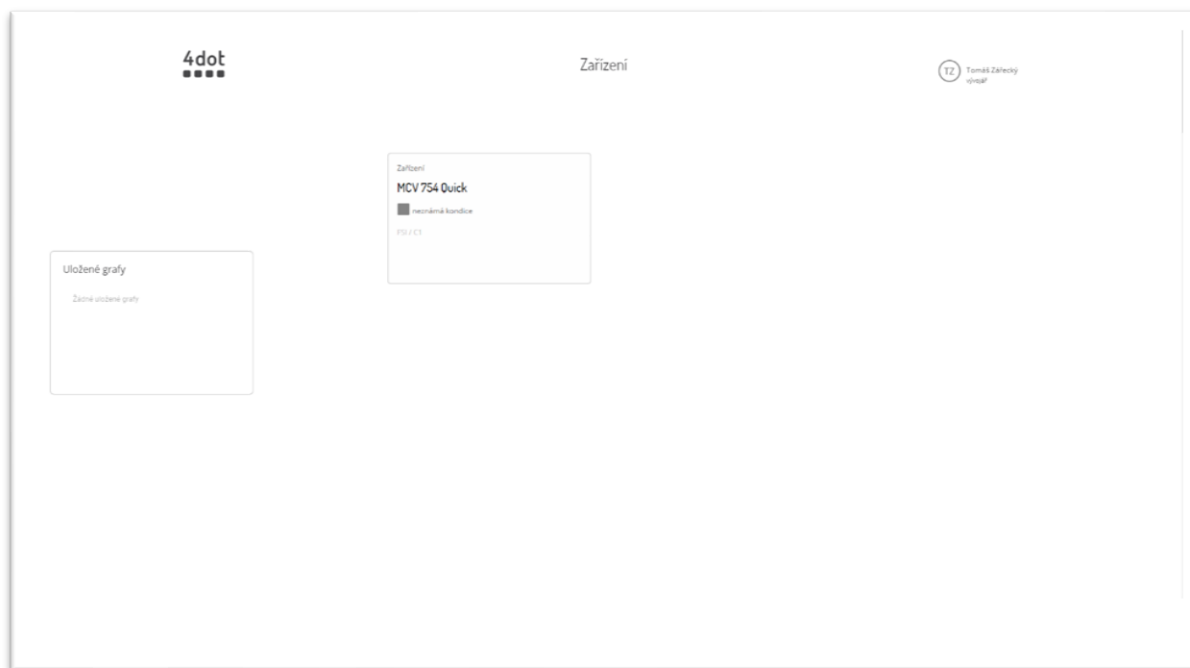


Data naměřená ve zvolený okamžik a zpracovaná FFT analýzou.

Pro zobrazení výstupů analýz ve webové aplikaci IDA je nutné komponentu a příslušné grafy nastavit jako public (při výběru komponenty, grafu, nebo na obrazovce zobrazení grafu).

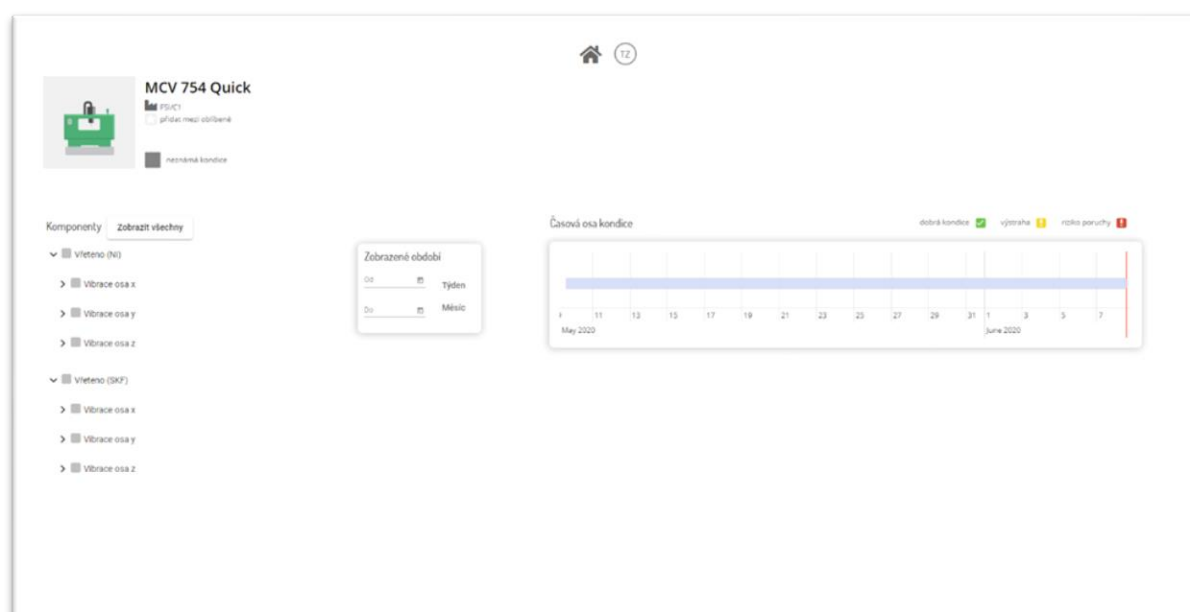
Příloha 4 – Webová aplikace IDA

Webová aplikace IDA je velmi podobná interní aplikaci 4dot, má pouze jiný vzhled a nezobrazují se v ní všechny vytvořené položky jako v interní aplikaci, ale pouze ty, ke kterým má uživatel povolený přístup a zároveň jsou nastavené jako public. Po přihlášení do aplikace se zobrazí obrazovka výběru zařízení, u kterého je také znázorněna kondice a umístění zařízení.



Obrazovka výběru zařízení.

Po výběru určitého zařízení se zobrazí přehled zařízení, kde jsou informace o zařízení, časová osa kondice, v rozbalovacím seznamu na levé straně komponenty a grafy, a také například zprávy přidávané k příslušnému zařízení.



Obrazovka přehledu zařízení.

Po výběru komponenty a grafu se zobrazí zvolený graf. Zobrazované období je možné měnit pomocí polí zobrazených nad samotným grafem. Na pravé straně se zobrazují zprávy, které se nacházejí v zobrazovaném období. Zprávu je možné přidat kliknutím na libovolný bod grafu, čímž se zobrazí okno přidání nové zprávy.



Obrazovka zobrazení grafu.